ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ – БАКАЛАВРИАТ

серия основана в 1996 г.

Я.Н. КОВАЛЕВ
С.Е. КРАВЧЕНКО
В.К. ШУМЧИК

ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Рекомендовано
Учебно-методическим объединением по образованию в области строительства и архитектуры в качестве учебно-методического пособия для студентов специальности 1-70 03 01 «Автомобильные дороги»

Электронно-Библиотечная Система
znanium.com

Соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту 3-го поколения

Минск
«Новое знание»

Москва
«ИНФРА-М»

2013

УДК 625.06/.07(075.8)
ББК 39.311-03я73
К56

Рецензенты:
кафедра «Автомобильные дороги» Белорусско-Российского университета (зав. кафедрой — кандидат технических наук, доцент *С.Н. Березовский*);
заслуженный деятель науки, доктор технических наук, профессор *В.Н. Яромко*

Ковалев, Я.Н.

К56 Дорожно-строительные материалы и изделия : учеб.-метод. пособие / Я.Н. Ковалев, С.Е. Кравченко, В.К. Шумчик. — Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2013. — 630 с. : ил. — (Высшее образование: Бакалавриат).

ISBN 978-985-475-537-3 (Новое знание)
ISBN 978-5-16-006403-1 (ИНФРА-М)

Изложены основы дорожно-строительного материаловедения и современные представления об универсальных строительных материалах, применяемых в строительстве автомобильных дорог, аэродромных покрытий и инженерно-дорожных транспортных сооружений. Описаны новые перспективные технологии. Особое внимание уделе-но повышению качества, долговечности и снижению энергоемкости строительных материалов.

Для студентов вузов. Может быть полезно магистрантам, аспирантам и инженерно-техническим специалистам дорожных организаций.

УДК 625.06/.07(075.8)
ББК 39.311-03я73

ISBN 978-985-475-537-3 (Новое знание)
ISBN 978-5-16-006403-1 (ИНФРА-М)

© Ковалев Я.Н., Кравченко С.Е., Шумчик В.К., 2013
© ООО «Новое знание», 2013

Оглавление

Предисловие 7

1. Введение в строительное материаловедение 10

1.1. Три этапа развития науки о строительных материалах 10
1.2. Классификация строительных материалов 17
1.3. Пути снижения энергозатрат при получении строительных материалов 20
Вопросы и задания для самопроверки 23

2. Структура и основные свойства строительных материалов 24

2.1. Структура материалов 24
2.2. Технологические принципы получения материалов с заданными свойствами 28
2.3. Свойства дорожно-строительных материалов 33
2.4. Пути повышения качества дорожно-строительных материалов 67
Вопросы и задания для самопроверки 70

3. Природные каменные материалы 71

3.1. Общие положения 71
3.2. Главные породообразующие материалы горных пород 73
3.3. Классификация горных пород 77
3.4. Виды и марки изделий из природных каменных материалов 89
3.5. Добыча и переработка природных каменных материалов 94
3.6. Требования к щебню, гравию и песку 98
3.7. Защита природных каменных материалов от коррозионного разрушения 104
3.8. Приемка каменных материалов. Техника безопасности и охрана окружающей среды 107
Вопросы и задания для самопроверки 109

4. Неорганические вяжущие материалы 110

4.1. Характеристика и классификация неорганических вяжущих веществ 110
4.2. Воздушные вяжущие вещества 111
4.3. Гидравлические вяжущие вещества 124
4.4. Портландцемент 128
4.5. Специальные виды портландцемента 155

4.6. Пуццолановые портландцементы 160
4.7. Местные вяжущие материалы 164
4.8. Шлаковые цементы 165
4.9. Глиноземистые (алюминатные) цементы 168
4.10. Расширяющиеся и безусадочные цементы 171
4.11. Транспортировка и хранение цементов 175
Вопросы и задания для самопроверки 177

5. Бетоны и железобетонные изделия 178

5.1. Общие положения 178
5.2. Классификация бетонов 179
5.3. Материалы для бетонов 182
5.4. Бетонная смесь и ее свойства 199
5.5. Тяжелый бетон 202
5.6. Бетоны специального назначения 237
5.7. Легкие бетоны 250
5.8. Железобетонные изделия 253
Вопросы и задания для самопроверки 275

6. Искусственные каменные материалы 276

6.1. Необжиговые строительные материалы и изделия 276
6.2. Обжиговые керамические строительные материалы и изделия 293
6.3. Искусственные заполнители на основе глинистого сырья для легких и тяжелых бетонов 306
6.4. Материалы из расплавов неорганических сырьевых масс 310
Вопросы и задания для самопроверки 321

7. Органические вяжущие материалы 323

7.1. Общие сведения и классификация органических вяжущих материалов 323
7.2. Дорожные вязкие битумы 325
7.3. Технология получения вязких и жидких дорожных битумов и методы их улучшения 342
7.4. Битумные эмульсии 362
7.5. Перевозка, подготовка, контроль и хранение органических вяжущих материалов 364
Вопросы и задания для самопроверки 367

8. Асфальтобетон и другие битумоминеральные материалы 368
8.1. Классификация битумоминеральных материалов 368
8.2. Классификация асфальтобетонных смесей 370
8.3. Материалы для асфальтобетонных смесей (по СТБ 1033–2004) 376
8.4. Конструкции дорожных одежд с асфальтобетонными покрытиями 389
8.5. Структура асфальтобетона 391
8.6. Свойства асфальтобетона 400
8.7. Проектирование состава асфальтобетона 420
8.8. Основы технологии приготовления асфальтобетонных смесей, их транспортирование, укладка и уплотнение 424
8.9. Штучные изделия из асфальтобетонных смесей 442
8.10. Регенерация старого асфальтобетона 449
8.11. Битумоминеральные материалы 452
Вопросы и задания для самопроверки 464

9. Полимерные материалы и изделия в дорожной отрасли 466
9.1. Общие сведения о полимерах и пластмассах 466
9.2. Свойства пластмасс как материалов, пригодных для использования при строительстве и ремонте дорог 483
9.3. Полимерные материалы для гидрофобизации и укрепления грунтов 486
9.4. Виды изделий из полимерных материалов 490
Вопросы и задания для самопроверки 503

10. Теплоизоляционные, гидроизоляционные, герметизирующие, лакокрасочные и акустические материалы ... 504
10.1. Теплоизоляционные материалы 504
10.2. Гидроизоляционные материалы 513
10.3. Герметизирующие материалы 522
10.4. Лакокрасочные материалы 524
10.5. Акустические материалы 531
Вопросы и задания для самопроверки 537

11. Строительные материалы из древесины 538
11.1. Общие сведения 538
11.2. Строение дерева 539
11.3. Макроструктура древесины 540

11.4. Микроструктура древесины 542
11.5. Характеристика древесины основных пород, применяемых в строительств 547
11.6. Свойства древесины 551
11.7. Применение деревянных конструкций в мостостроении 562
11.8. Виды изделий из древесины (сортамент)..... 566
11.9. Пороки древесины 570
11.10. Заготовка и сушка древесины..... 574
11.11. Защита древесины от гниения, разрушения насекомыми и возгорания..... 576
Вопросы и задания для самопроверки 582

12. Металлические материалы 583

12.1. Общие сведения 583
12.2. Структура и свойства металлов 586
12.3. Основы технологии черных металлов..... 590
12.4. Стали, применяемые в строительстве..... 597
12.5. Термическая и химико-термическая обработка сталей..... 603
12.6. Обработка металлов давлением и резанием 607
12.7. Сварка и резка металлов 611
12.8. Коррозия металлов и методы их защиты 616
12.9. Цветные металлы и сплавы 620
Вопросы и задания для самопроверки..... 623

Заключение 624

Список рекомендуемой литературы 629

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс «Дорожно-строительные материалы и изделия» является важным для подготовки специалистов дорожного профиля, потому что ни одно транспортное сооружение нельзя правильно спроектировать, построить и эксплуатировать без наличия соответствующих строительных материалов и всесторонней информации об их свойствах.

Стоимость дорожно-строительных материалов в общих затратах на строительство автомобильной дороги составляет 50...60 %, поэтому вопросам снижения материалоемкости их производства уделяется большое внимание. Для этих целей рекомендуется широко использовать местные строительные материалы и побочные продукты производства (золы, шлаки, отработанные формовочные смеси и др.).

При строительстве и ремонте дорог также находят широкое применение искусственные каменные материалы, модифицированные битумы, дорожные асфальто- и цементобетоны с активированными компонентами, погодоустойчивые и прочные пластмассы. Поэтому в пособии учитывается тенденция последовательного перехода на полную индустриализацию производства строительных материалов, в частности поставку вяжущих компонентов и изделий высокой строительной готовности (например, капсулированного битума, гранулированного асфальтовяжущего вещества для асфальтовых бетонов).

Данное пособие подготовлено в соответствии с типовой программой дисциплины «Дорожно-строительные материалы и изделия» для студентов высших учебных заведений по специальности I-70 03 01 «Автомобильные дороги». Его цель — дать студентам системные знания в области теории, технологии и практического, рационального применения строительных материалов при строительстве, ремонте и содержании объектов дорожного хозяйства.

Дисциплина «Дорожно-строительные материалы и изделия» опирается на знания студентов по физической и коллоидной химии, физике, математике и другим учебным дисциплинам. Освоение этих фундаментальных дисциплин в контексте с изучаемой прикладной дисциплиной дает возможность глуб-

же разобраться в сущности формирования структуры материалов при различных технологических процессах их получения и в режимах взаимодействия с окружающей средой в эксплуатационный период.

В реальных условиях «работы» материала в конструкциях он испытывает воздействия не только погодно-климатических факторов, но и силовых нагрузок. В последнем случае особенности влияния таких факторов рассматриваются с учетом знаний, полученных при изучении курса «Сопротивление материалов».

В настоящее время при разработке технологических режимов производства и выборе оптимальных составов различных композиций широко применяются математические методы планирования и пр. Таким образом, фундаментальные знания по общетеоретическим дисциплинам позволяют не только оценить потенциальные возможности строительных материалов, но и принимать обоснованные решения по их использованию в конкретных эксплуатационных условиях.

Известно, что прогресс науки и техники постоянно вносит существенные коррективы в нормативно-технические документы (ГОСТы, СТБ, СНиПы, ТУ, ДМД и др.), что стимулирует появление новых материалов и технологий. Такая ситуация влияет на ускоренное «старение» учебной литературы, которая не успевает отражать нововведения, совершающиеся в течение сравнительно короткого периода времени (5–10 лет). Чтобы продлить «жизнь» данного пособия, авторы стремились излагать информацию по основным видам строительных материалов с учетом возможного появления новых или совершенствования известных технологий.

Образовательные задачи, решаемые пособием, включают:

- изучение материалов, применяемых в конструкциях сооружений дорожного комплекса в данный момент, и возможностей их улучшения в будущем;
- знакомство с информацией о способах ресурсо- и энергосбережения при получении и применении строительных материалов с соблюдением требований промышленной экологии и охраны окружающей среды.

Авторы стремились к краткости изложения разделов дисциплины при максимально возможной иллюстративности, историчности и научной обоснованности эффективного получения и сохранения свойств материалов в эксплуатационный период. В конце каждой главы приведены вопросы и задания для самоконтроля и осмысления проработанного материала.

Пособие написано коллективом авторов: доктор технических наук, профессор Я.Н. Ковалев, кандидат технических наук, доцент С.Е. Кравченко, кандидат технических наук В.К. Шумчик. Общее методологическое руководство и научное редактирование выполнено Я.Н. Ковалевым.

Авторы признательны рецензентам: заслуженному деятелю науки, доктору технических наук, профессору В.Н. Яромко и кандидату технических наук, доценту С.Н. Березовскому — за ценные замечания по содержанию и структуре пособия, которые учтены при подготовке рукописи к изданию.

1 ВВЕДЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

1.1. Три этапа развития науки о строительных материалах

Современное строительное материаловедение — прикладная наука, базирующаяся на положениях фундаментальных наук: химии, физики, реологии, математики и др. Ее роль в строительном производстве огромна. Без постоянно развивающихся знаний о материалах и изделиях из них невозможно спроектировать, построить и эксплуатировать любой качественный и долговечный инженерный объект (здание, дорогу, мост и т.п.).

Строительное материаловедение изучает огромный спектр различных природных и искусственных материалов, вырабатываемых в соответствующих специфических отраслях промышленности. Тем не менее, строительное материаловедение объединяет все многообразие материалов в единую систему с общими научными принципами, методами и закономерностями. Такой системный подход позволяет прогнозировать появление новых, пока еще не открытых материалов с оставлением «вакантных» мест в соответствующих их классификациях (подобно тому, как это происходит с Периодической системой Д.И. Менделеева).

История развития науки о строительных материалах уходит в далекое прошлое. Профессор И.А. Рыбьев выделяет три основных, не одинаковых по продолжительности этапа развития науки о строительных материалах, между которыми нет четких разделительных границ*. Главным критерием для их выделения во времени является состояние производства, пос-

* *Рыбьев И.А.* Основы строительного материаловедения в лекционном изложении. М.: Астраль, 2006. 604 с.

кольку его совершенствование во многом определялось потребностями общества в материалах.

Первый этап (до 1-й пол. XIX в.) является наиболее длительным по времени. Исходной точкой отсчета начала развития науки о материалах признан момент получения *керамики* путем осознанного изменения структуры глины при ее обжиге. Это подтверждено результатами археологических раскопок. Вначале свойства изделий улучшали правильным подбором глины, а затем — их обжигом на открытом огне в специальных примитивных печах. Однако первым этапом в этой технологии стали попытки использования глины как вяжущего воздушного твердения. Это объясняется тем, что глина очень проста в применении и не требует помола, а нуждается лишь в разминании и увлажнении. Для предотвращения усадки и растрескивания глины отощались песком, а для увеличения прочности в глиняное тесто (раствор) добавляли траву, рубленую солому, шерсть животных (это был первый опыт упрочнения изделий путем армирования).

Значительно позднее человечество начало широко использовать металлы, прочность и жесткость которых были известны еще в 8-м тыс. до н.э. Вначале была открыта холоднокованая самородная *медь*. Позже она была заменена медью, выплавляемой из руд, которые встречались в недрах земли чаще и в значительно больших объемах. В дальнейшем к меди стали добавлять другие металлы и примерно в 3-м тыс. до н.э. люди научились получать и использовать сплав меди с оловом — *бронзу* (бронзовый век). К этому же периоду относится время, когда люди научились обрабатывать *благородные металлы* (серебро, золото).

С течением времени объемы использования металлов возрастали и человечество вступило в железный век, поскольку железные руды оказались гораздо доступнее медных. Таким образом, в 1-м тыс. до н.э. в производстве орудий и инструментов стало преобладать *железо*.

Сознательное создание все более сложных керамических и металлических изделий было обусловлено потребностями развивающегося мореплавания, ирригации, строительства различных зданий и сооружений, укрепления дорог.

Крупный вклад в развитие науки о материалах внесли выдающиеся русские ученые М.В. Ломоносов и Д.И. Менделеев.

М.В. Ломоносов (1711—1765) заложил основы науки в области химии и физики. Им был открыт закон сохранения материи и движения, разработаны важнейшие положения в области физической химии. Он написал первую книгу на русском языке по металлургии, получил составы цветных стекол и изготовил из них мозаичные панно. Вклад Ломоносова в различные отрасли знания неоценим и его роль в развитии материаловедения огромна.

Д.И. Менделеев (1834—1907) открыл важнейший закон природы — периодический закон, в соответствии с которым свойства химических элементов находятся «в периодической зависимости от величины их атомных весов». Менделеев получил важные результаты в исследовании растворов, опубликовал книгу «Основы химии», в которой описал атомно-молекулярное строение вещества. Ему также принадлежит первый труд по основам стекольного производства.

В качестве некоторого итога становления и развития науки о строительных материалах на первом этапе можно отметить сравнительно ограниченное количество разновидностей изучавшихся материалов и данных об их свойствах.

Однако несмотря на слабое развитие точных наук, великие ученые и философы прошлых столетий на основе интуиции, логики, гипотез и теорий сумели дать достаточно полное представление о структуре материалов, установить общие зависимости их свойств (в основном механических) от состава. Например, Р. Гук еще в 1665 г. выявил типичную кристаллическую структуру железа.

Второй этап (2-я пол. XIX в. — 1-я пол. XX в) характеризуется созданием новых материалов и их массовым производством. Это было вызвано бурным развитием промышленности, строительством многочисленных инженерных сооружений. Кроме того, развитию науки о материалах способствовали новые открытия в области исследования их составов, структуры и оценки свойств. Ярким примером является открытие в 1912 г. явления дифракции рентгеновских лучей, что позволило создать фундаментальный физический метод изучения структу-

ры различных материалов. Достижения в физике, химии, минералогии и других науках явились фундаментом для дальнейшего развития строительного материаловедения.

Второй этап развития науки о материалах существенно отличается от первого. Действительно, если на первом этапе устанавливались лишь общие связи между атомно-молекулярным составом веществ и их свойствами, то на втором этапе главным стало всестороннее изучение конкретных материалов, создаваемых для возводимых строительных объектов, и обеспечение их высокого качества.

Наблюдается также начало четкой дифференциации исследований применительно к запросам отдельных производств материалов. На этом этапе каждая отрасль производства получала от науки максимум информации о необходимом для нее сырье, способах его переработки, объективных методах оценки свойств готовой продукции, ее стандартизации и путях дальнейшего улучшения качества.

Развитие наук о Земле: геологии и геохимии (академики В.А. Обручев, А.Е. Ферсман, В.И. Вернадский и др.) — способствовало выявлению новых месторождений полезных ископаемых. Было установлено, что на долю девяти химических элементов приходится 98 % земной коры, причем половину из этого количества составляет кислород и более одной четверти — кремний. Было также определено, что бóльшая часть элементов образует в земной коре различные химические соединения — кристаллические и аморфные минералы. Эти данные о минеральном сырье интенсивно использовались для его переработки в заводских условиях с получением минеральных вяжущих веществ, керамики, стекла и других промышленно выпускаемых строительных материалов.

Особенно подробно были изучены глины. Труды В.И. Вернадского, Н.А. Земятченского и других исследователей по глинам способствовали созданию промышленно развитой отрасли производства керамики и керамического строительного кирпича. Исследования в этом направлении внесли неоценимый вклад в создание керамических огнеупоров, что было крайне необходимым для развития металлургии.

Следует особо отметить успехи в производстве вяжущих веществ (строительного гипса и гидравлической извести) в России в XVIII в. В начале XIX в. Е.Г. Челиевым было открыто новое вяжущее, получившее в дальнейшем название *портландцемент*. Особенно большой вклад в развитие цементной промышленности в России внес Н.А. Белелюбский и его специализированная лаборатория.

Массовый выпуск цементов способствовал производству *бетонов* и появлению науки о бетонах — бетоноведения. Большой объем исследований в этом направлении выполнили Н.М. Беляев, Б.Г. Скрамтаев и др. Это позволило создать расчет состава плотного бетона.

Одновременно формировалась технология изготовления *железобетона* и наука о железобетоне. Открыл явление упрочнения бетона с помощью железной арматуры парижский садовник Ж. Монье в 1867 г.

В 1881 г. профессор Н.А. Белелюбский провел успешные испытания различных конструкций из железобетона.

Следующим большим шагом в развитии железобетона явилось внедрение в начале XX в. предварительно напряженной арматуры.

Продолжались также научные исследования и совершенствовались технологии многих других строительных материалов безобжигового типа (асфальтобетон, полимерные материалы, ситаллы и др.).

В целом науку о строительных материалах на втором этапе можно рассматривать как сложную совокупность знаний о конкретном материале на базе фундаментальных наук — физики и химии.

На втором этапе были изданы монографии, посвященные отдельным материалам, а также учебники по строительным материалам. Так, например, в 1896 г. В.В. Эвальдом был написан учебник, выдержавший 14 переизданий: «Строительные материалы, их изготовление, свойства и испытания». Далее были подготовлены известные учебники В.А. Кинда и С.Д. Окорокова (1934), Б.Г. Скрамтаева, Н.А. Попова (1950) и др.

Общепризнанно, что учебно-методическая литература в различные периоды сыграла огромную роль в систематизации знаний о научных основах производства различных материалов, а также обучении кадров инженеров-строителей и технологов.

Третий этап развития науки о строительных материалах охватывает современный период, начавшийся со 2-й половины XX в.

Для него характерны следующие особенности:

1) дальнейшее расширение объема производства традиционных и появление новых материалов; при этом наблюдается возросший уровень теоретических исследований применительно к конкретному виду материалов;

2) интеграция научных знаний о строительных материалах (например, физико-химическая механика дисперсных материалов, «отцом» которой стал академик П.А. Ребиндер).

Эти два сложных процесса взаимосвязаны и обогащают друг друга. Они оказывают существенное влияние на эффективное решение проблем повышения качества и снижения стоимости материалов, изделий и конструкций на их основе.

Импульсом, стимулирующим указанные процессы, явились последствия Второй мировой войны, потребовавшие огромного объема работ по восстановлению разрушенных городов, промышленных зданий и транспортных коммуникаций во многих странах мира.

Строительство интенсивно переводилось на индустриальные способы, благодаря внедрению крупноразмерных изделий и конструкций из сборного железобетона.

Это, в свою очередь, потребовало реконструкции и расширения производства цемента и увеличения его ассортимента. Было разработано около 30 видов цемента, включая быстротвердеющие, высокомарочные расширяющиеся и безусадочные. Развитие металлургии способствовало созданию и выпуску в больших объемах шлакопортландцемента. Стала перспективной организация производства шлако-щелочных вяжущих веществ, характеризуемых высокой прочностью.

Большие успехи были достигнуты в стекольной промышленности: разработаны стеклохолст, стеклосетки, стеклопластики, стеклорубероид, ситаллы. Вместо металлической

арматуры в бетонах стали использовать стеклополимерные стержни и сетки.

Совершенствовалось производство полимеров. В основе достижений в этой области материаловедения лежат открытия выдающихся ученых-химиков: труды А.М. Бутлерова (середина XIX в.) в области химических реакций получения органических полимеров; С.В. Лебедева (конец XIX — начало XX в.), исследовавшего процесс полимеризации ненасыщенных соединений и являющегося одним из создателей производства синтетического каучука; Н.Н. Семенова, разработавшего теорию цепных реакций и описавшего закономерности таких реакций при полимеризации. Большие заслуги в создании новых видов пластмасс принадлежат К.А. Андрианову, А.А. Берлину, В.А. Каргину и др.

В области строительного материаловедения значительный вклад внесли труды И.А. Рыбьева, Н.В. Горелышева (дорожный асфальтобетон), В.И. Соломатова (композиционные материалы), И.Н. Ахвердова (цементобетоны) и многих других.

На современном этапе наука о материалах представляет собой систему обобщенных взглядов и характеризуется коренным пересмотром критериев прогрессивных технологий с выходом их на оптимальные значения. При этом четко прослеживается действие законов развития материи в системах структура — состав — свойства с научной конкретизацией категории «оптимальная структура материала».

Философская направленность развития строительного материаловедения выражается в том, что в ней действуют две тенденции: 1) идет дальнейшая дифференциация научных знаний о материалах; 2) происходит одновременный синтез научных знаний о них.

Обе тенденции «подпитываются» применением новых видов сырья, вяжущих веществ, заполнителей, добавок и технологий, использующих известные физические эффекты (ультразвук, электрогидравлический эффект, трибоактивация и др.). В совокупности обе указанные тенденции обогащают друг друга и вскрывают новые закономерности (например, «закон створа» И.А. Рыбьева) или кардинально улучшают технологию получения традиционных материалов (например,

активация компонентов асфальтобетона на основе известных физических эффектов)*.

Таковы краткие теоретические и экспериментальные аспекты исторического развития строительного материаловедения как непрерывного движения. Суть этого динамического процесса состоит в постоянном совершенствовании и переходе от старого к новому, от простого к сложному, от низкого к более развитому уровню производительных сил общества.

1.2. Классификация строительных материалов

В настоящее время перечень строительных материалов насчитывает сотни наименований.

Строительные материалы можно классифицировать по различным признакам:

- по *функциональному назначению*: конструкционные, теплоизоляционные, гидроизоляционные, разметочные и т.д.;
- *происхождению*: природные и искусственные; при этом различают их химическую природу (органические и неорганические). К природным относят каменные породы, гравий, песок и др.; искусственные получают переработкой природного сырья (нефтяные дорожные битумы, щебень, керамические материалы, вяжущие и т.д.) или путем синтеза химических соединений (например, смолы, клеи);
- *технологическим признакам*: безобжиговые (гипс, известь, битумы, эмульсии, пасты, цементобетоны и т.д.), обжиговые (клинкерные цементы, керамический кирпич, каменное литье, стекло, ситаллы) и автоклавного твердения.

Основным критерием указанного разделения материалов по технологическому признаку является характер их отвердевания. Безобжиговые материалы твердеют при обычных температурах (или с применением тепловлажностной обработки при сравнительно невысокой температуре) с образованием новых химических соединений; автоклавные твердеют при по-

* См.: *Ковалев Я.Н.* Активационные технологии дорожных композиционных материалов. Минск, БелЭН, 2002. 336 с.

вышенных температурах (175...200 °С) и повышенном давлении пара в автоклаве (0,9...1,6 МПа); обжиговые — с полной или частичной кристаллизацией из жидких расплавов.

Общая схема классификации строительных материалов представлена на рис. 1.1.

Природные материалы получают непосредственно из недр земли или путем переработки лесных массивов в «деловой лес». К другим получаемым в природе материалам, полезным для строительных целей, относятся киры (природный битум), продукты растительного (камыш, солома, торф и др.) или животного (шерсть, коллаген* и др.) происхождения.

Древесные материалы (хвойные и лиственные) разделяются по ассортименту на круглые, пиленые и штучные, а получаемые при переработке побочного продукта стружка, опилки используются для производства плитных и других штучных изделий.

Каменные природные материалы и изделия классифицируют по генетическому признаку либо по техническим свойствам — средней плотности, прочности, морозостойкости. По химическому составу их подразделяют на кислые (например, SiO_2) и основные (например, $CaCO_3$).

Искусственные материалы имеют более обширную классификацию, учитывающую вид вяжущего (органические, неорганические, полимерные), а также технологию их получения (обжиговые, необжиговые).

На основе *органических вяжущих* (битумы, дегти, эмульсии) получают асфальто- и дегтебетоны, а также эмульсионно-минеральные смеси.

Полимерные вяжущие вещества (термопластичные, термореактивные) являются важной матричной частью полимербетонов, строительных пластмасс, стеклопластиков и др., так называемых композиционных материалов.

Использование комплексных вяжущих веществ является основой для создания сложных бетонов (например, полимерцементные бетоны, силикатополимерные бетоны и др.).

---

* Коллаген — фибриллярный белок, составляющий основу соединительной ткани животных (сухожилие, кость, хрящ) и обеспечивающий ее прочность.

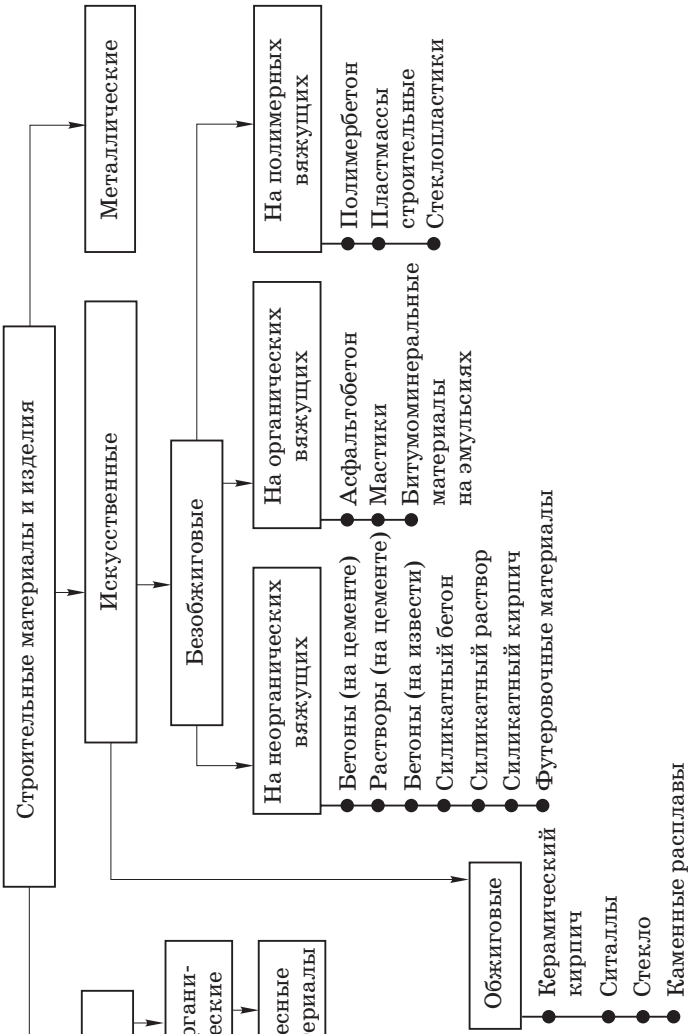


Рис. 1.1. Классификация строительных материалов

Обжиговый способ обработки исходных керамических веществ при высоких температурах формирует такие материалы, как керамобетон, а на основе стекла — ситалл. Технология каменного литья позволяет получать очень прочные материалы (например, на основе горной породы базальта получают базальтин).

В классификационной схеме строительных материалов в группе «искусственные материалы» могут быть зарезервированы «вакантные места» для еще не созданных строительных материалов. Например, вполне возможно появление металлоцементобетонов с использованием металлофибровой тонкодисперсной матрицы или песчаных асфальтобетонов на целлюлозно-матричной основе.

Металлические материалы занимают в классификации строительных материалов самостоятельную группу.

В заключение можно отметить, что классификация искусственных строительных материалов продолжает расширяться с появлением новых вяжущих веществ и заполнителей, а также по мере разработки новых («прорывных») и модернизации существующих технологий. Тем не менее, сохраняется неизменной ее главная черта — единство физико-химических принципов образования структур строительных материалов, где бы они ни находились в системе общей классификации. Одним из таких принципов является общее подобие материалов между собой, наличие оптимальной структуры и подчинение закону створа Рыбьева*.

1.3. Пути снижения энергозатрат при получении строительных материалов

Экономия топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на производственных предприятиях любой отрасли хозяйства — важная государственная задача.

Энергопотребление при массовом получении строительных материалов является составной частью общего материально-

* Закон створа Рыбьева будет рассмотрен в главе 2.

технического баланса в строительстве, ремонте и содержании дорог.

В связи с удорожанием топливно-энергетических ресурсов проведение теплотехнического аудита и составление оптимального энергобаланса на каждом производственном предприятии дорожной отрасли (асфальтобетонный завод (АБЗ), цементобетонный завод (ЦБЗ) и др.) становятся крайне необходимыми.

Резервы экономии ТЭР на производственных предприятиях, поставляющих строительные материалы, состоят в устранении следующих негативных причин:

- недостаточное обоснование выбора базовых объектов для добычи и приготовления дорожно-строительных материалов, что приводит к излишней дальности их доставки и, вследствие этого, увеличению транспортных расходов;
- нарушение технологических режимов и низкий КПД используемого устаревшего оборудования;
- значительные потери тепла как на самих предприятиях (в основном АБЗ, битумохранилища), так и при перевозке готовой продукции к месту работ (доставка асфальтобетонной горячей смеси на большое расстояние).

Выполненные исследования показали, что КПД использования расходуемых энергоресурсов при производстве строительных материалов составлял 30...35 %. Это свидетельствует о том, что общие потери ТЭР велики, а резервы экономии энергоресурсов значительны.

Энергобаланс предприятия — это затраты энергии на всех этапах производства материалов (полуфабрикатов), включая поступление исходных материалов, их переработку, внутризаводское транспортирование и доставку к месту работ без снижения качественных показателей (относится, прежде всего, к горячим полуфабрикатам — асфальтобетонной смеси).

Изучение энергобаланса АБЗ, ЦБЗ, камнедробильного завода (КДЗ) или другого производственного предприятия рекомендуется начинать с составления блок-схемы технологического процесса данного предприятия. При этом должны четко выделяться источники потребления тепловой и электрической энергии. Такой системный подход позволяет опре-

делить удельный расход энергии на каждую технологическую операцию и, как итог, расход энергии на единицу готовой продукции.

Энерготехнологический анализ предприятия позволяет разработать мероприятия по снижению себестоимости производимых строительных материалов, не снижая их качества, а в результате уменьшить энергоемкость ВВП дорожной отрасли в целом.

Как показали исследования, механическое и тепловое оборудование производственных предприятий имеет определенные уровни расхода энергии при обработке исходных материалов. Определение этих уровней позволяет рассчитать затраты каждого вида энергии на всех технологических операциях и отнести их к единице готовой продукции (или полуфабриката). Примером подобных расчетов может являться расчет энергозатрат при производстве дорожно-строительных работ какой-то машиной или механизмом с двигателем внутреннего сгорания:

$$Э = \sum_i \left(\frac{N_i q_i M_i k_т}{П_i} \right), \qquad (1.1)$$

где Э — сумма энергозатрат машины (механизма) при осуществлении различных операций, МДж на единицу продукции (т, м^3); N_i — мощность двигателя, кВт; q_i — удельный расход топлива, кг/(кВт · ч); M_i — объем работ, (т, м^3, м^2, м пог.); $k_т$ — коэффициент, учитывающий расход топлива при различных режимах работы двигателя; $П_i$ — производительность машины (механизма), т/ч, м^3/ч, м^2/ч, пог. м/ч.

В расчетах должны учитываться показатели загрузки механизмов, потребляющих электроэнергию в течение машиносмены, часовая потребность в энергии и количество времени, затрачиваемое на выполнение заданного объема работ. Затем производится пересчет в эквивалентные единицы тепловой энергии.

При составлении *топливно-энергетического баланса производственного предприятия* применяется метод пересчета всех видов энергии в условное топливо и определения удель-

ного веса каждого вида энергии в процентах к общему энергопотреблению.

Пересчет в условное топливо производится исходя из уровня расхода на производство энергии по переводным коэффициентам (например, для электроэнергии — 1000 кВт · ч = = 0,35 т у.т.).

Величина удельных затрат энергии ($E_{уд}$) на производство строительных материалов рассчитывается как отношение суммарных затрат энергии по предприятию в эквивалентных единицах (ΣE) к объему выпущенной продукции (Q):

$$E_{уд} = \frac{\Sigma E}{Q}. \qquad (1.2)$$

Этот показатель является контрольным при оценке эффективности использования топливно-энергетических ресурсов на предприятии (для него обычно устанавливается нормативное значение).

Вопросы и задания для самопроверки

1. Почему строительное материаловедение является фундаментальной наукой прикладного характера?

2. Назовите и кратко опишите три этапа развития науки о строительных материалах.

3. Как классифицируются строительные материалы по происхождению и технологическим признакам?

4. Назовите основные резервы экономии ТЭР на производственных предприятиях, изготавливающих строительные материалы.

2 СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1. Структура материалов

Структура (от лат. structura — строение, расположение, порядок) — совокупность устойчивых связей объекта, обеспечивающих его целостность, т.е. сохранение основных присущих ему свойств при различных внешних воздействиях и внутренних изменениях.

Структурная характеристика материала — это его паспорт; например, кристаллическая структура обладает одними свойствами, аморфная — совершенно другими. Имея один и тот же вещественный состав, но различную структуру, материалы при воздействии на них силовых и других факторов будут вести себя совершенно по-разному. Например, гранит (скальная горная порода) и природный кварцевый песок, имеющие кристаллическую структуру, и тот же кварцевый песок, но с поверхностной аморфной (неупорядоченной) структурой имеют один и тот же вещественный состав (SiO_2), но совершенно разные свойства. Так, прочность материалов при одном и том же вещественном составе может различаться в 1000 раз и более.

Значительный вклад в теорию и практику материалов внесли академик П.А. Ребиндер, профессора И.А. Рыбьев, Н.В. Горелышев, В.И. Соломатов, И.В. Королев и др.

Структура материалов очень сложна, поэтому для ее изучения используют разнообразные методы. В соответствии с ними выделяют:

- *макроструктуру* — строение материала, видимое невооруженным глазом;
- *микроструктуру* — строение материала, видимое в микроскоп;
- *ультрамикроструктуру* — внутреннее строение вещества, составляющего материал, изучаемое методами электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа.

Отправной точкой в изучении структуры строительных материалов является изучение строения вещества, состоящего из атомов одного или нескольких химических элементов, между которыми существуют устойчивые энергетические связи. Среди этих связей выделяют основные: ионную, ковалентную, металлическую, различающиеся взаимодействием электронов на внешней (валентной) оболочке атомов.

Ионная связь вызывается силами притяжения между противоположно заряженными ионами.

Ковалентная связь характеризуется принадлежностью электрона одновременно двум атомам, т.е. дополнение недостающих наружных электронов происходит не за счет отбора электронов, как в случае ионной связи, а в результате образования общих пар электронов у взаимодействующих атомов.

При *металлической связи* отрицательно заряженные электроны как бы «омывают» положительно заряженные ионы, образующие кристаллический каркас вещества.

Существуют и другие формы химической связи: водородная (характерна для воды, льда), донорно-акцепторная (некоторые полимеры) и др. Имеют место также межмолекулярные (ван-дер-ваальсовы) связи, представляющие собой взаимодействие между нейтральными молекулами, т.е. молекулами с насыщенной валентностью.

Свойства вещества зависят от химического строения его молекул, в которых атомы расположены таким образом, чтобы общая потенциальная энергия системы была минимальной.

Различают кристаллическую и аморфную структуры вещества.

Идеальный ***кристалл*** имеет пространственную решетку, в узлах которой с периодичностью, характерной для данного вещества, расположены атомы, ионы и молекулы. Их расположение определяется энергетической выгодностью узлов и расстояний между частицами, образующими пространственную решетку.

Наряду с кристаллической, имеет место ***аморфная*** структура вещества. Вследствие избыточной химической активности данная структура менее устойчива и при определенных условиях переходит в кристаллическую .

Строение реальных кристаллических и аморфных веществ существенно отличается от идеальных, что вызвано наличием в них различных *микродефектов*. Наиболее характерными микродефектами в аморфных веществах являются микропоры, а в кристаллических — дислокации (линейные дефекты, искривляющие кристаллическую решетку). Наибольшее количество микродефектов концентрируется на границе срастания микрочастиц (межкристаллические слои) и на поверхностях раздела фаз (поверхностных слоях).

Структура материала у поверхности значительно отличается от структуры в его толще. На поверхности материала атомы и молекулы вещества не уравновешены другими микрочастицами, вследствие чего они более энергетически активны, чем аналогичные частицы внутри материала. Именно поэтому поверхность материала всегда адсорбирует газообразные и другие вещества, что существенно изменяет свойства не только поверхностного слоя, но и материала в целом.

Отметим наиболее характерные ***особенности структуры материалов***.

1. **Нестабильность.** Воздействия внешней среды (механические нагрузки и погодно-климатические факторы) постоянно изменяют структуру материалов, вызывая в них внутренние напряжения.

В неоднородных материалах, к которым относится большинство видов дорожных бетонов, в отдельных местах (поры, микротрещины, контактные слои, дефекты в кристаллах) возникают концентрации микронапряжений и микродеформаций, что при определенных воздействиях факторов внешней среды способствует увеличению и накоплению количества дефектов в структуре материала.

Напряженно-деформационные процессы в композиционных материалах в значительной степени являются релаксационными, однако они, как правило, протекают очень медленно (например, время релаксации напряжений для бетона составляют 10^6 с).

2. **Неоднородность.** Особенно неоднородной является структура композиционных материалов (асфальто- и цементобетоны), которая в значительной мере зависит от фазового состо-

яния их компонентов (твердое, пластичное, кристаллическое, аморфное и т.п.).

Важнейшими критериями качества структуры являются истинная и средняя плотность, пористость материала, степень адгезии компонентов между собой, крупность и форма зерен заполнителей. Зная эти показатели, можно судить о прочности, долговечности и других свойствах материалов.

Одним из основных показателей качества строительных материалов является их ***прочность***. Теоретическая прочность материалов превышает реальную прочность на несколько порядков. Это объясняется тем, что микродефекты в структуре материала вызывают бóльшую концентрацию напряжений и способствуют ускорению процессов разрушения структуры материалов. Наиболее высокой прочностью обладает идеально однородный материал, т.е. не имеющий никаких микродефектов в своей структуре (рис. 2.1).

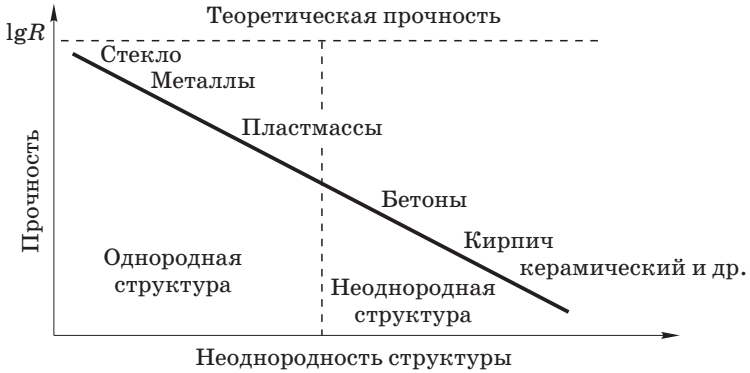


Рис. 2.1. Зависимость прочности материалов от неоднородности их структуры

Большое влияние на прочность и другие свойства материалов оказывает пористость их микроструктуры. При этом различают следующие виды пористости:

- пористость, образующаяся вследствие воздухововлечения во время технологических процессов (размер пор 10^{-3}...10^{-4} м);
- капиллярная пористость, образующаяся за счет тепломассообменных процессов (например, испарения влаги в бетоне в период набора им прочности; размер пор 10^{-5}...10^{-7} м);

■ контракционная пористость, образующаяся при формировании ультрамикроструктуры материалов (размер пор $10^{-7}...10^{-9}$ м).

Структура оказывает большое влияние на технологические, изоляционные, теплотехнические, акустические, прочностные и эксплуатационные свойства материалов, а также на их долговечность. Поэтому, умея оптимизировать структуру, можно существенно улучшать свойства материалов. В настоящее время это осуществляется на этапе реализации технологических процессов создания материалов.

2.2. Технологические принципы получения материалов с заданными свойствами

Существует большое количество технологий производства искусственных строительных материалов. Однако при таком их многообразии имеются общие принципиальные положения, являющиеся основой при выборе технологического процесса производства материалов с заданными свойствами.

Одним из главных положений, формирующих современную технологию производства строительных материалов, является то, что эта технология является преимущественно *химической*. Исходя из этого положения для выбора и обоснования технологических принципов получения материалов с заданными свойствами необходимо знать:

■ состав и структуру веществ, из которых состоят исходные материалы, особенности их межмолекулярных связей;

■ закономерности химических реакций и физико-химических процессов (растворение, кристаллизация, смачивание, адсорбция, адгезия);

■ особенности взаимодействия дисперсных коллоидных частиц и т.п.

Принципы, формирующие современные технологии искусственных строительных материалов, излагаются в таких фундаментальных науках, как физика и механика. Проектируя тот или иной технологический процесс переработки исходного сырья, необходимо знать основные законы этих дисциплин,

определяющие особенности реологических свойств материалов, тепломассообменные процессы, протекающие во время их производства.

Поясняя это положение, можно отметить, что все технологические процессы протекают при различных вариациях давлений и температур. Например, исходя из нормальных температуры $T_н$ и давления $P_н$ можно получить различные варианты их сочетания: $P > P_н$ и $T > T_н$, $P > P_н$ и $T = T_н$, $P = P_н$ и $T > T_н$ и т.д. Поэтому законы термодинамики широко используются в технологии строительных материалов.

Первый закон термодинамики представляет собой математическое выражение закона сохранения энергии, из которого следует, что переданное системе количество теплоты Q расходуется только на увеличение внутренней энергии ΔU и совершение работы A:

$$Q = \Delta U + A.$$

Второй закон термодинамики утверждает, что все процессы в материалах протекают в направлении от менее вероятного состояния (неустойчивого) к более вероятному (равновесному). Для каждой комбинации внешних условий характерно свое равновесное состояние, которое восстанавливается при его нарушении.

Первый закон термодинамики позволяет проводить теплотехнические расчеты технологических процессов. Второй закон определяет направление самопроизвольно идущих процессов в материалах и пределы их протекания.

Общей особенностью технологических процессов является то, что большинство из них развивается по закономерностям цепных реакций, т.е. с развитием этих процессов их скорость возрастает или затухает. Такие закономерности в ряде случаев можно описать зависимостью

$$dy/dt = ky^m, \qquad (2.1)$$

где y — переменная, характеризующая, например, количественно процесс смешения, степень растворения, уплотнения и т.д.; dy/dt — скорость изменения этой переменной во времени; k — коэффициент. Если $m = 1$, то функция принимает вид экспоненты.

При проектировании технологии материалов очень часто используют *закон тепломассообменных процессов*, которые описываются дифференциальным уравнением

$$\frac{dT}{dt} = a\nabla^2 T, \qquad (2.2)$$

где T — температура; t — время; a — коэффициент температуропроводности материала $\left(a = \frac{\lambda}{c\rho_0}\right)$; ∇^2 — оператор Лапласа $\left(\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)$.

Существуют приемы, которые позволяют управлять сложными процессами структурообразования и получать материалы с оптимальными свойствами. Их условно разделяют на три группы: механические, физические и химические.

Одним из распространенных механических приемов управления структурообразованием материалов является *вибрация*. Она широко используется, например, в процессах перемешивания и уплотнения бетонных смесей. При вибрационном воздействии структура бетонных смесей разрушается, при этом резко снижается их вязкость и они приобретают свойства жидкости, что облегчает перемешивание, уплотнение и получение изделий заданной плотности. Вибрация применяется и в других видах механической обработки материалов (она облегчает резание, точение, сверление, уменьшает трение и т.д.).

Для каждого конкретного случая применения вибрации устанавливают оптимальные величины частоты и амплитуды колебаний, а также момент ее приложения и продолжительность воздействия.

К наиболее значимым физическим приемам, применимым в технологии материалов, можно отнести *регулирование температурного воздействия* и *методы активации исходных компонентов*. Правильное назначение температурных режимов позволяет управлять скоростью физических и химических реакций и процессов, протекающих в материалах (разжижение битумов и удаление из них воды, обжиг кирпича, сушка древесины, твердение минеральных вяжущих и др.). Активация

твердых и жидких компонентов для получения композиционных материалов (асфальто- и цементобетонов) способствует усилению адгезии между этими компонентами, т.е. созданию прочных химических связей между ними.

К перспективным физическим методам обработки исходных материалов следует отнести использование *ультразвукового*, *магнитного*, *электромагнитного*, *электрогидравлического* и *трибоэлектрического воздействия*. Их применение интенсифицирует процессы структурообразования и улучшает качество материалов.

К наиболее устоявшимся химическим технологическим приемам относится применение различных добавок и поверхностно-активных веществ.

Добавки как средство регулирования свойств материалов химическим путем известны давно, но широкое применение они получили лишь в последнее время (особенно для получения цементобетонов). Введение добавок (пластифицирующих, гидрофобных, воздухововлекающих и др.) позволяет влиять на технологические параметры строительных материалов, замедлять или ускорять процессы, протекающие в них, улучшать их свойства, обеспечивать в ряде случаев производительность перемешивания и уплотнения смесей.

Минеральные добавки играют роль центров кристаллизации, служат катализаторами, ингибиторами или стабилизаторами в процессах структурообразования материалов. Например, в цементы вводят добавки с активным кремнеземом SiO_2, с гидрооксидом кальция $Ca(OH)_2$, в результате чего образуются нерастворимые вещества, упрочняющие структуру бетона.

Значительное распространение получили и полимерные добавки. Например, при использовании водорастворимых полимеров бетонная смесь пластифицируется, что облегчает формование изделий; затем эти добавки полимеризуются и образуют прочную сетчатую структуру, что способствует упрочнению бетона.

В настоящее время при производстве различных строительных материалов стали широко применять *поверхностно-активные вещества* (ПАВ). Эффект их применения заклю-

чается в том, что их молекулы, адсорбируясь на поверхности зерен материалов, уменьшают поверхностную энергию на границах раздела твердое тело — жидкость (газ).

Подбирая ПАВ для целенаправленного изменения поверхностной энергии материалов, можно:

- получать устойчивые эмульсии или, наоборот, добиваться быстрого их распада при контакте с минеральными материалами;
- пластифицировать бетонные смеси;
- регулировать содержание газообразной фазы в материалах;
- существенно снижать затраты энергии на дробление и измельчение материалов, поскольку ПАВ обусловливают адсорбционное понижение их прочности (эффект П.А. Ребиндера).

Наряду с ПАВ, в технологии производства материалов используют также *добавки-электролиты*, которые могут ускорять или замедлять процессы растворения веществ, изменять свойства жидкой фазы. При этом изменяются растяжимость, температура размягчения, хрупкость и другие свойства материалов.

Одним из основных принципов технологических процессов производства материалов высокого качества является комплексность использования физических, механических и химических методов воздействия на исходное сырье и материал.

Эффект комплексного воздействия указанных методов широко используется в технологии материалов и материаловедении. Его значимость настолько велика, что именно благодаря ему учение о превращении исходного сырья в материал с заданными свойствами получило название физико-химической механики материалов и стало основой всех прогрессивных технологий строительных материалов.

Технологию получения строительных материалов максимально механизируют и автоматизируют, при этом особое внимание уделяют оптимизации технологических процессов на основе применения ЭВМ.

Следует подчеркнуть, что современная технология строительных материалов обязательно учитывает меры по энергосбережению и требования промышленной экологии.

2.3. Свойства дорожно-строительных материалов

Проектировщик и инженер-строитель при выборе материала и обосновании его целесообразности в строительной конструкции (здания, моста, дорожной одежды и т.д.) должен учитывать (прогнозировать) его способность сопротивляться реальным эксплуатационным нагрузкам внешней среды. Под внешней средой, применительно к дорожным объектам, понимают воздействие механических нагрузок от транспорта, погодно-климатических факторов и химических реагентов.

Материал при работе в конструкции не должен подвергаться нарушениям сплошности и изменению размеров в расчетный период при заданных нагрузках внешней среды. Он всегда должен работать надежно, сопротивляясь комплексу сжимающих и растягивающих напряжений, воздействиям колебаний температур, водной среды и химических агрессивных веществ (растворов солей, кислот, щелочей и др.). Следовательно, для обоснования выбора строительного материала необходимо учитывать комплекс его свойств. ***Свойством*** называется способность материала определенным образом реагировать на воздействие внешних или внутренних силовых, тепловых, усадочных и других факторов внешней среды.

Свойства материалов разделяют на четыре группы: механические, физические, химические и технологические. В совокупности их называют *техническими свойствами строительных материалов*. Численные значения свойств, необходимые для сравнения с нормативными требованиями, получают с помощью соответствующих приборов и оборудования в ходе лабораторных или полевых испытаний материалов.

2.3.1. Механические свойства

Механические свойства отражают способность материалов сопротивляться силовым (от механических перегрузок), тепловым и усадочным напряжениям без изменения структуры материала. Под напряжением упрощенно понимают внутрен-

нюю силу, приходящуюся на единицу площади в данной точке данного сечения. Различают полное напряжение, имеющее направление равнодействующей внутренних сил; нормальное, направленное вдоль нормали к сечению; касательное, направленное вдоль касательной, лежащей в плоскости сечения. Напряжения измеряются в МПа. В зависимости от величины возникающих напряжений материалы деформируются или разрушаются.

Механические свойства разделяют на деформационные и прочностные.

Деформационные свойства. Эти свойства характеризуют способность материала изменять первоначальные размеры, форму или объем без изменения массы под действием нагрузок или других воздействий (температура, влажность).

Деформация — изменение первоначальных размеров, объема или формы твердого или пластичного тела без изменения массы. Главные виды деформаций (рис. 2.2): растяжение, сжатие, сдвиг, кручение, изгиб. Все виды деформаций могут быть *обратимыми* или *необратимыми* (остаточными).

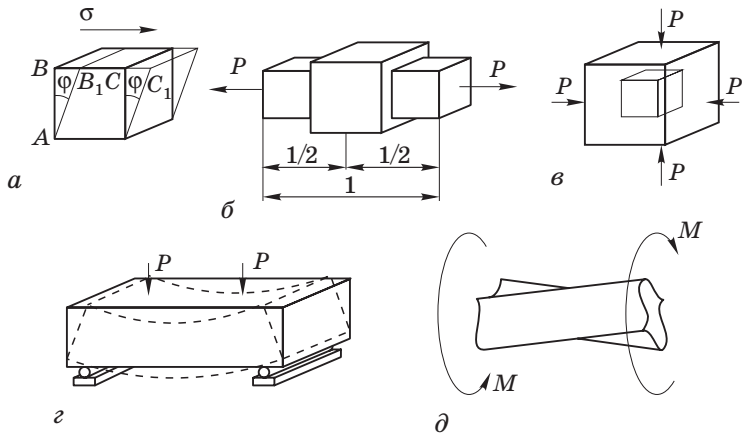


Рис. 2.2. Виды деформаций:
а — простой сдвиг; *б* — одноосное растяжение; *в* — объемное деформирование при сжатии; *г* — изгиб; *д* — кручение

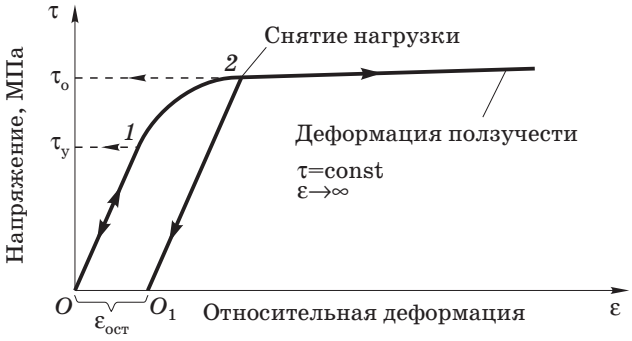


Рис. 2.3. Диаграмма деформаций в упругом теле: *O–1* — упругая деформация; *1* — начало пластической деформации; $O–O_1$ — остаточная деформация при снятии нагрузки в точке *2*; $\tau_о$ — предел текучести; $\tau_у$ — предел упругости

Обратимые деформации, которые исчезают мгновенно и полностью, называются *упругими*, а деформации, исчезающие только через некоторое время или вообще не исчезающие, — *пластическими* (*остаточными*) (рис. 2.3).

Твердые тела по-разному реагируют на снятие нагрузки, проявляя при этом свойства упругости или пластичности.

Упругость — свойство материала мгновенно восстанавливать свои форму и объем после прекращения действия внешних сил. Наибольшее напряжение, при котором проявляется лишь упругая деформация, называют *пределом упругости*. К упругим материалам относятся природные и искусственные каменные материалы, стекло, сталь.

Пластичность — свойство материала необратимо деформироваться под действием внешних сил. К пластичным материалам относятся битумы при положительных температурах, глины в увлажненном состоянии, некоторые виды пластмасс, бетонные и растворные смеси до затвердевания.

Механические свойства материалов оцениваются количественными показателями, получаемыми в результате испытаний. Наибольшую информацию о механических свойствах материала обеспечивает испытание образцов на растяжение при статическом нагружении, в процессе которого строится диаграмма в координатных осях «напряжение τ — относительная

деформация ε» (см. рис. 2.3). Относительная деформация определяется соотношением $\varepsilon = \Delta l / l$, где Δl — абсолютное линейное изменение образца, мм, за время t, ч; l — начальная длина образца, мм.

Начальные участки диаграммы деформирования всегда прямолинейны (*O–1*). Это означает, что материал работает в упругой стадии. Связь напряжения и деформации на этом участке описывается с помощью закона Гука:

$$\sigma = E\varepsilon, \tag{2.3}$$

где E — модуль упругости материала, МПа.

Пластическая деформация за пределами предела текучести τ_0 переходит в область нарастания деформации без увеличения внешней нагрузки (τ = const), т.е. в область *ползучести материала*.

Деформационные свойства строительных материалов обусловливаются релаксационными процессами. ***Релаксацией*** называется процесс самопроизвольного падения внутренних напряжений в материале при условии, что образованная величина деформации остается неизменной (например, жестко зафиксированной).

Время (*период*) *релаксации* $\theta_р$ определяет продолжительность релаксационных процессов, в результате которых первоначальная величина напряжений при строго зафиксированной деформации снижается в e раз:

$$\theta_р = \tau / e, \tag{2.4}$$

где e — основание натурального логарифма (e = 2,718).

Характер снижения первоначального напряжения τ_0 во времени t при зафиксированной деформации описывается уравнением

$$\tau_t = \tau_0 e^{-\frac{t}{\lambda}}, \tag{2.5}$$

где λ — постоянная времени релаксации ($\lambda = \frac{\eta}{E}$, где η — вязкость).

Так, например, если у образца внутреннее напряжение было 8 МПа, а образовавшаяся под влиянием этого напряже-

ния деформация была жестко зафиксирована, то продолжительность времени $\theta_р$, (с, мин), за которое напряжение самопроизвольно снизилось до $8/2{,}718 = 2{,}94$ МПа, называется временем (периодом) релаксации.

Время релаксации является важной характеристикой строительных материалов: чем оно меньше, тем менее деформативным является материал. Однако время релаксации не является постоянной величиной: оно зависит от температуры испытания и скорости приложения нагрузки. Действительно, напряжение, развивающееся в материале под действием нагрузки, определяется межмолекулярным взаимодействием частиц, интегрально определяемым вязкостью η и модулем упругости E, которые, в свою очередь, зависят от температуры и скорости приложения нагрузки:

$$\theta_р = \frac{f(\eta, E)}{e}.$$

В связи с этим деформации могут быть очень сложными — упруго-вязкими или упруго-вязко-пластическими (рис. 2.4).

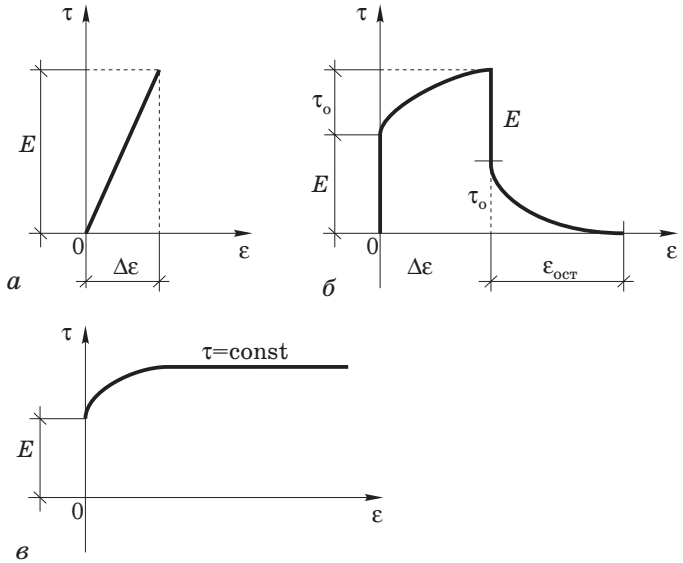


Рис. 2.4. Графики взаимосвязи напряжений τ и деформаций ε: *а* — упругая деформация; *б* — упруго-пластическая деформация; *в* — пластическая деформация, переходящая в ползучесть

Важную роль (кроме температуры) играют продолжительность действия сил и ее сопоставимость с временем релаксации.

Рассмотрим два характерных случая. При малой продолжительности действия сил (или кратковременном наблюдении) по сравнению с величиной времени релаксации ($\theta << \theta_р$) все материалы ведут себя как упруго-хрупкие и имеют полную обратимость деформации, если напряжения не нарушают их сплошности. Так, например, при малом времени действия сил на воду, время релаксации которой составляет порядка 10^{-11}с, она ведет себя как кристаллическое твердое тело. При большой длительности действия сил по сравнению с величиной времени релаксации ($\theta >> \theta_р$), материал течет подобно жидкости.

Прочностные свойства. Основным механическим свойством материалов является ***прочность***, т.е. способность материала, не разрушаясь, сопротивляться внутренним напряжениям и деформациям, возникающим под влиянием механических, усадочных, температурных или иных воздействий.

Типичными прочностными характеристиками являются: предел упругости, предел текучести, предел прочности.

Предел упругости ($\tau_у$) — напряжение, при котором относительное остаточное удлинение достигает некоторого значения, установленного техническими условиями (например, 0,001 или 0,03 %). Предел упругости ограничивает область упругих деформаций.

Предел текучести ($\tau_т$) — наименьшее напряжение, соответствующее состоянию текучести материала образца.

Предел прочности ($\tau_п$) — напряжение, соответствующее началу разрушения материала образца, вызываемое наибольшим усилием в нем и определяемое как отношение действующей силы к площади поперечного сечения образца.

Прочностные характеристики пластичного материала приведены на рис. 2.5.

Материал может резко терять свою прочность после приложения к нему циклической нагрузки. Это обусловлено усталостью материала — накоплением неотрелаксированных на-

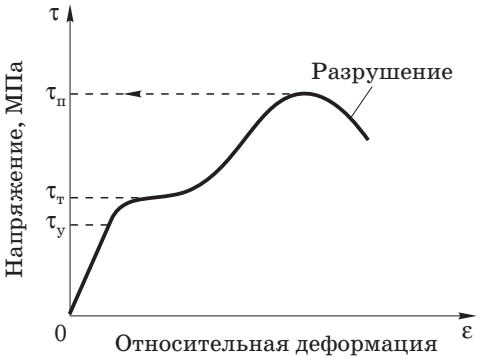


Рис. 2.5. Диаграмма условных напряжений, полученных при растяжении образца из пластичного металла: $\tau_у$ — предел упругости; $\tau_т$ — предел текучести, $\tau_п$ — предел прочности (временное сопротивление)

пряжений, вызывающих необратимые микродефекты в его структуре. Соответствующая прочность называется *усталостной*.

В зависимости от характера приложения нагрузки *F* различают прочность на сжатие, растяжение, изгиб, скалывание (срез) (рис. 2.6).

Для экспериментального определения предела прочности материала используют образцы правильной геометрической формы: кубы, призмы, цилиндры, стержни. Размеры образцов, процедура испытания, вид и скорость нагружения, правила обработки результатов выдерживаются в строгом соот-

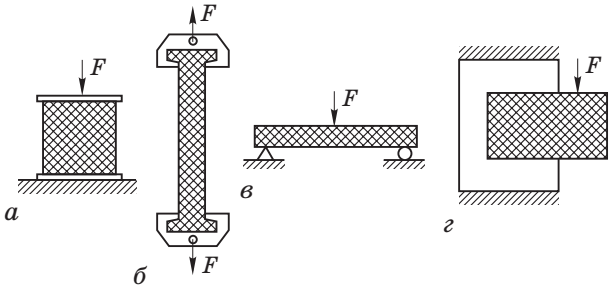


Рис. 2.6. Схемы определения прочности материалов: *а* — при сжатии; *б* — растяжении; *в* — изгибе; *г* — срезе

ветствии с требованиями стандартов. Чаще всего материалы испытывают сжимающей или растягивающей нагрузкой F.

Предел прочности при сжатии или растяжении R рассчитывают по формуле

$$R = \frac{F_{\text{разр}}}{S}, \tag{2.6}$$

где $F_{\text{разр}}$ — разрушающая нагрузка, Н; S — площадь первоначального сечения образца в плоскости, перпендикулярной действию нагрузки, м^2.

Иногда для сравнения прочностных характеристик материалов используют показатель их удельной прочности — *коэффициент конструктивного качества*:

$$K_{\text{к.к}} = \frac{R}{\rho_0}, \tag{2.7}$$

где ρ_0 — средняя плотность материала.

Значения $K_{\text{к.к}}$ для некоторых строительных материалов приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Коэффициент конструктивного качества различных материалов

Материал	$K_{\text{к.к}}$
Высокопрочные стали	100…150
Древесина вдоль волокон	100
Кирпич	5…6
Обычные стали	Более 50
Стеклопластики	Более 250
Тяжелый бетон	От 8 до 25

Предел прочности при изгибе образца прямоугольного сечения при одной сосредоточенной нагрузке в середине пролета (рис. 2.7) определяют по формуле

$$R_{\text{изг}} = \frac{3Fl}{2bh^2}, \tag{2.8}$$

где F — разрушающая нагрузка, Н; l — расстояние между опорами, м; b, h — ширина и высота поперечного сечения образца, м.

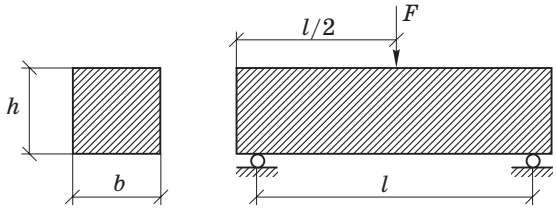


Рис. 2.7. Схема испытания образца на изгиб

Прочность материала зависит от его структуры и наличия в ней дефектов, пористости, влажности, состояния поверхности и других факторов.

Кроме прочности технической (реальной), существует прочность, рассчитываемая вычислением (теоретическая). Упрощенный метод оценки теоретической прочности твердых тел предложил М. Поляни-Орован, исходя из сил молекулярного (атомного) взаимодействия. Он рассуждал следующим образом.

Если, например, для разрыва стержня сечением 1 мм^2 приложили напряжение τ_0 и при этом атомные плоскости удалились друг от друга на величину α, то потребовавшаяся для этого работа выразится как произведение $\tau_0\alpha$. При разрыве стержня образовались две новые поверхности площадью 2 мм^2, а затраченная работа перешла в свободную поверхностную энергию, которую можно обозначить как g и выразить в Дж/мм^2. Следовательно, $\tau_0\alpha = 2g$. Отсюда теоретическая прочность $\tau_0 = 2g/\alpha$.

Расчеты показали, что теоретическая прочность материалов на порядки (100–10 000 раз) выше технической (реальной) прочности (табл. 2.2).

Приближенно теоретическая прочность однородного материала при растяжении $R_р$ (или τ_0) может быть вычислена по формуле

$$R_р = \tau_0 = 2\sqrt{\frac{GE}{x}}, \qquad (2.9)$$

где G — поверхностная энергия твердого тела, Дж/см^2; E — модуль упругости, МПа; x — межатомное расстояние, в среднем равное $2 \cdot 10^{-8}$ см.

Таблица 2.2

Значения модуля упругости и прочности материалов при растяжении

Материал	Модуль упругости E, МПа	Теоретическая прочность τ_0, МПа	Техническая прочность $\tau_т$, МПа	$\tau_0/\tau_т$
Сталь	210 000	21 000	300	70
Стекло	80 000	8 000	80	100
Дерево вдоль волокон	11 000	1 100	120	9
Полистирол	3 000	300	30	10

Большое различие между теоретической и реальной прочностью материалов объясняется наличием в структуре существующих материалов микродефектов (микропоры, микротрещины и т.п.). Чем крупнее образцы, тем больше дефектов они содержат в своей структуре и тем ниже их реальная прочность. Зависимость прочности от размера изделий в материаловедении называется *масштабным эффектом*.

Учитывая большую роль микродефектов (особенно микротрещин) в установлении реальной прочности твердых материалов, интенсивно проводились исследования в области возможных методов ее расчета. Наиболее известен метод Гриффитса. Он предложил следующую формулу для расчета реальной прочности твердых тел, имеющих микротрещины:

$$R = \sqrt{\frac{2E_{п}E_{у}}{l}}, \qquad (2.10)$$

где $E_{п}$ — свободная поверхностная энергия; $E_{у}$ — модуль упругости материала; l — длина поперечной микротрещины в образце, составляющая к моменту разрушения образца несколько микрометров.

Прочность лучше, чем другие свойства материала, отражает изменения, происходящие в его структуре (особенно кристаллической). Поэтому ее можно изменять в необходимом направлении путем изменения микро- и макроструктуры материалов за счет уменьшения микродефектов. Практически это достигается введением различных добавок, повышением

дисперсности структурных компонентов, изменением пористости и др.

Дополнительными характеристиками механических свойств могут служить твердость, истираемость и ударная вязкость (динамическая прочность) материалов.

Твердость — свойство материала сопротивляться проникновению в него другого, более твердого тела. Твердость природных каменных материалов оценивают по шкале Мооса, представляющей собой 10 минералов, расположенных в порядке возрастания их твердости:

1) тальк ($Mg_3[Si_4 \cdot O_{10}]\,[OH]_2$);
2) гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$);
3) кальцит ($CaCO_3$);
4) флюорит (плавиковый шпат) (CaF_2);
5) апатит ($Ca_5[PO_4]_3 \cdot (F, Cl, OH)_2$);
6) ортоклаз ($KAlSi_3O_8$);
7) кварц (SiO_2);
8) топаз ($Al_2\,[F,OH]_2SiO_4$);
9) корунд (Al_2O_3);
10) алмаз (C).

Показатель твердости материала находится между показателями двух соседних минералов, один из которых чертит, а другой сам чертится этим материалом.

Твердость древесины, металлов, бетона и некоторых других строительных материалов определяют, вдавливая в них с силой P стальной шарик или твердый наконечник в виде конуса или пирамиды. В результате испытания вычисляют число твердости $НВ = P/S$, где S — площадь поверхности отпечатка.

От твердости материалов зависит их ***истираемость*** — способность материала уменьшаться в массе и объеме под действием истирающих усилий. Истираемость тем меньше, чем больше твердость.

Истирающему воздействию постоянно подвергаются покрытия автомобильных дорог (от колес движущегося транспорта), полы и лестницы зданий (от движения людей) и т.п.

Истираемость оценивают потерей первоначальной массы образца материала, отнесенной к площади поверхности истирания:

$$И = \frac{m_1 - m_2}{S} \text{ (г/см}^2\text{)}, \qquad (2.11)$$

где m_1 и m_2 — масса образца до и после истирания.

Сопротивление материала истиранию определяют стандартными методами: кругом истирания и абразивами (кварцевым песком и наждаком).

О более сложном свойстве — ***износе*** (***износостойкости***) материала судят по испытанию образца определенной массы: его вращают в специальном металлическом барабане вместе с набором металлических шаров или без них. Чем сильнее разрушается образец, тем больше износ, определяемый в процентах (по массе).

Ударная вязкость (***динамическая прочность***) — способность материала сопротивляться сосредоточенным ударным нагрузкам. Она определяется количеством работы, затрачиваемой на излом образца в фиксированном с помощью насечки месте.

Динамическую прочность чаще всего определяют ударными испытаниями на маятниковых копрах и вычисляют по формуле

$$R_g = \frac{A}{S} \text{ (Дж/м}^2\text{, Дж/см}^2\text{)}, \qquad (2.12)$$

где A — работа, затраченная на разрушение стандартного образца, Дж; S — площадь сечения образца в месте разрушения (см^2, м^2).

Отношение динамической прочности к статической называют *динамическим коэффициентом*.

2.3.2 Физические свойства

Физические свойства отражают способность материала противостоять физическим эксплуатационным воздействиям: осадкам в виде дождя или снега, сезонным и суточным изменениям температуры воздуха и т.д.

К физическим свойствам относятся свойства, связанные со строением и физическим состоянием материала: плотность (истинная, средняя, насыпная); свойства, связанные с отношением материала к воде (водопоглощение, водонасыщение, влажность, гигроскопичность, водонепроницаемость, водостойкость, морозостойкость), к действию тепла и изменению температуры окружающей среды (теплопроводность, теплоемкость, термостойкость, огнестойкость, огнеупорность), к звуковым волнам и химическим реагентам.

Параметры состояния. ***Истинная плотность*** (часто просто ***плотность***) $\rho_и$ — плотность того вещества, из которого состоит материал.

Она определяется как отношение массы материала m (г, кг) к его объему V в абсолютно плотном состоянии (без пор и пустот):

$$\rho_и = \frac{m}{V} \text{ (г/см}^3\text{, кг/м}^3\text{).} \qquad (2.13)$$

Истинная плотность — физическая константа вещества.

Плотность строительных материалов колеблется в очень широких пределах: от 15 (кг/м^3 у пористой пластмассы) до 7850 кг/м^3 (у стали).

Средняя плотность ρ_0 — плотность материала, при расчете которой используется его полный объем V_0 в естественном состоянии, включая поры и пустоты:

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0}. \qquad (2.14)$$

Для определения объема в этом случае удобно использовать образцы правильной геометрической формы (куб, цилиндр). Если образцы имеют неправильную геометрическую форму, то их среднюю плотность определяют методом гидравлического взвешивания или с помощью объемомера.

Относительная плотность (φ) — это степень заполнения объема материала плотным веществом. Она характеризует структуру материала и равна отношению средней плотности к истинной:

$$\varphi = \frac{\rho_0}{\rho_и}.$$

Насыпная плотность $\rho_н$ представляет собой отношение массы свободно насыпанного сыпучего рыхлого зернистого материала (песка, гравия, щебня), в том числе материала в виде порошка (цемент, известь, минеральный порошок для асфальтобетона), с учетом пор и межзерновых пустот, ко всему занимаемому им объему:

$$\rho_н = \frac{m}{V_0} \text{ (кг/м}^3\text{)}. \qquad (2.15)$$

На среднюю и насыпную плотность материала влияет его влажность. Вода замещает (вытесняет) воздух в порах материала и адсорбируется на поверхности его зерен. Поэтому, как правило, чем больше влажность материала, тем больше его плотность.

Для каждого материала ГОСТы (СТБ) устанавливают влажность, при которой определяется его плотность. Например, плотность тяжелого бетона определяют при его естественной влажности в сухом состоянии, древесины — при влажности 12 %.

Структурные характеристики. ***Пористость*** — степень заполнения объема материала порами. Ее можно рассчитать по следующей формуле:

$$П = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_и}\right)100. \qquad (2.16)$$

Пористость выражают в долях от объема материала, принимаемого за единицу, или в % от объема.

В случае если необходимо определить, какую часть пор в материале составляют замкнутые (они менее опасны) или открытые, как они распределяются в объеме материала, каково соотношение пор разных диаметров, то проводят дополнительные исследования с помощью специальных методов: ртутной пирометрии, капиллярного всасывания и др.

На прочность материалов значительно влияют величина пористости и размер пор. При одном и том же составе вещества строительный материал тем слабее сопротивляется механическим силам, чем больше и крупнее поры в его объеме.

От пористости зависят и другие качественные характеристики материала, например способность проводить теплоту, звук, поглощать воду.

Различают открытую и закрытую пористость материалов.

Открытая пористость $П_о$ равна отношению суммарного объема всех пор, насыщающихся водой, к объему материала V:

$$П_о = \frac{m_2 - m_1}{V} \frac{1}{\rho_{H_2O}},$$

где m_1 и m_2 — масса образца соответственно в сухом и насыщенном водой состоянии; ρ_{H_2O} — плотность воды.

Открытые поры материала сообщаются с окружающей средой и могут сообщаться между собой, поэтому они заполняются водой при обычных условиях насыщения, например при погружении образцов материала в ванну с водой. Открытые поры увеличивают проницаемость и водопоглощение материала и ухудшают морозостойкость.

Поры по своему размеру подразделяют на капиллярные (капилляры) и некапиллярные. К *капиллярным* принято относить поры с условным радиусом не более 10 мкм. Вода в них может попадать в результате капиллярного подсоса, который связан с ее поверхностным натяжением. *Некапиллярные поры* (т.е. поры с условными радиусами более 10...20 мкм) могут заполняться водой только при погружении материала в жидкость. Эти открытые поры заполняются водой постепенно и не полностью, так как этому препятствует находящийся там воздух.

Открытые поры с защемленным в них воздухом профессор С.В. Шестоперов назвал «подрессорными порами». Он показал пути создания таких пор в бетонах, используемых в транспортном строительстве, для повышения их морозостойкости, например, с помощью специальных воздухововлекающих добавок.

Увеличение *закрытой пористости* за счет открытой повышает долговечность материала. Однако в звукопоглощаю-

щих материалах и изделиях умышленно создается открытая пористость и перфорация, необходимые для поглощения звуковой энергии.

В современных поромерах измерение пористости автоматизировано и результат выдается в готовом виде в цифровой и графической формах.

Пустотность. Пустоты в рыхлых насыпных материалах (межзерновое пространство) значительно крупнее пор. Вода в них не задерживается (быстро испаряется или стекает).

Расчет пустотности производят по формуле

$$\text{Пуст} = \left(1 - \frac{\rho_н}{\rho_0}\right)100. \qquad (2.17)$$

Гидрофизические свойства. Способность материала поглощать воду оценивается по показателям водопоглощения, водонасыщения, гигроскопичности, влажности, влагоотдачи, капиллярного всасывания, водопроницаемости.

Водопоглощение — способность открытых пор материала поглощать воду в течение определенного времени при обычном давлении и температуре. Полному и быстрому заполнению открытых пор препятствует находящийся в них воздух. Время водопоглощения различных материалов в лаборатории определяется соответствующими стандартами.

Различают водопоглощение по массе и водопоглощение по объему.

Водопоглощение по массе W_m определяется как отношение массы поглощенной воды к массе сухого материала:

$$W_m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\,\%, \qquad (2.18)$$

где m_1 — масса сухого материала; m_2 — масса насыщенного водой материала.

Водопоглощение по объему W_V определяется как отношение массы поглощенной воды к объему сухого материала V:

$$W_V = \frac{m_2 - m_1}{V} \cdot 100\,\%. \qquad (2.19)$$

Поскольку объем сухого материала равен $V = \frac{m_1}{\rho_0}$, то

$$W_V = W_m \rho_0. \qquad (2.20)$$

Водопоглощение различных материалов колеблется в широких пределах: гранита — 0,2...0,7 %, тяжелого бетона — 2...4 %, кирпича — 8...15 %, пористых теплоизоляционных материалов — 100 % и больше.

Водопоглощение по массе может быть больше пористости (у высокопористых материалов), но водопоглощение по объему никогда не может превысить ее.

Водопоглощение отрицательно влияет на основные свойства материала: материал набухает, плотность и теплопроводность его увеличиваются, а прочность и морозостойкость понижаются.

Водопоглощение используют для оценки структуры материала, применяя для этой цели *коэффициент насыщения пор водой*, равный отношению водопоглощения по объему к пористости:

$$K_н = W_V/П.$$

Коэффициент насыщения может изменяться от 0 (все поры материала замкнутые) до 1 (все поры открытые, тогда $W_0 = П$). Уменьшение $K_н$ при той же пористости свидетельствует о сокращении открытой пористости, что обычно проявляется в повышении морозостойкости.

Водонасыщение определяется количеством воды, которое может поглотить материал в вакууме или при повышенном давлении. При этом из открытых пор полностью вытесняется воздух и они целиком заполняются (насыщаются) водой.

Водонасыщение характеризует объем открытых пор в материале. Оценка этого показателя осуществляется по тем же зависимостям, что и для водопоглощения.

Гигроскопичность — способность капиллярно-пористого материала поглощать влагу из окружающего влажного воздуха или паро-газовой смеси. Степень поглощения воды или паров, которые частично конденсируются в порах и капиллярах материала, зависит от относительной влажности и температуры воздуха.

Характеристикой этого свойства материала является отношение массы поглощенной влаги при относительной влажности воздуха 100 % и температуре +20 °С к массе сухого материала.

Влажность — содержание влаги в материале (естественная влажность в данный конкретный момент), отнесенное к массе материала в сухом состоянии (%):

$$W_{\text{вл}} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100, \qquad (2.21)$$

где m_1 — масса материала в естественно-влажном состоянии, г; m_2 — масса материала, высушенного до постоянной массы, г.

Влагоотдача — способность материала отдавать влагу в окружающую среду. Эта характеристика материала измеряется количеством воды, которое материал теряет в сутки при относительной влажности воздуха 60 % и температуре +20 °С. Если между влажностью окружающей среды и влажностью материала устанавливается равновесие, то гигроскопичность и влагоотдача отсутствуют. Такое состояние называется *воздушно-сухим*.

Капиллярное всасывание воды — способность пористого материала всасывать воду. Так, например, грунтовые воды земляного полотна дороги могут подниматься по капиллярам пор и увлажнять нижние слои дорожной одежды.

Капиллярное всасывание характеризуется высотой поднятия воды в капилляре, которая рассчитывается по формуле

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{r\rho_{H_2O} g}, \qquad (2.22)$$

где σ — поверхностное натяжение воды; θ — краевой угол смачивания; r — радиус капилляра (поры); ρ_{H_2O} — плотность воды при данной температуре; g — ускорение свободного падения.

Поры в строительных материалах имеют неправильную форму и изменяющееся поперечное сечение (радиус). Поэтому приведенная формула годна лишь для качественного рассмотрения капиллярного всасывания воды в материал.

Объем воды V, поглощенный материалом путем капиллярного всасывания за время t, приближенно описывается формулой

$$V^2 = kt, \qquad (2.23)$$

где k — константа всасывания.

Водопроницаемость (водонепроницаемость) — способность материала пропускать (не пропускать) воду под давлением. Это свойство материала характеризуют коэффициентом фильтрации $K_ф$:

$$K_ф = \frac{V_в a}{S(p_1 - p_2)t} \text{ (м/ч)}, \qquad (2.24)$$

где $V_в$ — количество воды, м^3, проходящей через стенку площадью $S = 1$ м^2 и толщиной $a = 1$ м за время $t = 1$ ч при разности гидростатического давления на границах стенки $p_1 - p_2 = 1$ м водного столба.

При строительстве гидротехнических сооружений, резервуаров, коллекторов, труб водопроницаемость этих сооружений не допускается. Для ее предотвращения стремятся применять достаточно плотные материалы с замкнутыми порами (стекло, сталь, полиэтилен), устраивают гидроизоляционные слои, экраны.

Для определения водонепроницаемости существуют различные методики. Но общая схема такова: на одной поверхности материала создают давление воды и определяют, появится ли вода на его противоположной поверхности. Водопроницаемость характеризуют либо временем появления первой капли воды при заданном давлении, либо давлением, при котором это произошло.

Вода — один из главных врагов строительных материалов. Ее воздействие вызывает определенные последствия: усадку, набухание, снижение прочности при обычных положительных температурах; при переходе через нулевую температуру в сторону отрицательных значений (после n циклов замораживания-оттаивания) прочность материалов существенно снижается, что оценивается их морозостойкостью.

Усадка (усушка) — уменьшение размеров материала при его высыхании. Этот процесс вызывается уменьшением толщины пленок воды, окружающих частицы материала, и действием внутренних капиллярных сил, стремящихся сблизить частицы материала.

В табл. 2.3 представлены значения усадки некоторых строительных материалов.

Таблица 2.3

Усадка строительных материалов

Материал	Усадка, мм/м
Древесина поперек волокон	30...100
Кирпич	0,03...0,1
Строительный раствор	0,5...1
Тяжелый бетон	0,02...0,06
Ячеистый бетон	1...3

Набухание (разбухание) — увеличение объема материала после водопоглощения. Причина этого явления состоит в том, что полярные молекулы воды, проникая в полости между частицами или волокнами материала, как бы «расклинивают» их, при этом утолщаются гидратные оболочки вокруг частиц.

Чередование высыхания и увлажнения пористых материалов сопровождается попеременными деформациями усадки и набухания. Такие многократные циклические воздействия вызывают появление трещин, что уменьшает прочность и долговечность сооружений.

Снижение прочности материала после его водонасыщения (водостойкость) характеризуется *коэффициентом размягчения*:

$$K_{\text{разм}} = \frac{R_{\text{нас}}}{R_{\text{сух}}}, \qquad (2.25)$$

где $R_{\text{нас}}$ — предел прочности при сжатии насыщенного водой материала; $R_{\text{сух}}$ — предел прочности сухого материала.

Требования к этому показателю для различных материалов определяются условиями эксплуатации и регламентированы различными стандартами и техническими условиями. Например, для асфальтовых бетонов, используемых в верхнем слое покрытий, он должен быть не менее 0,8...0,9.

Морозостойкость — свойство насыщенного водой материала выдерживать попеременное замораживание-оттаивание.

Попеременное замораживание-оттаивание материалов происходит в осенний и весенний периоды года, когда температура воздуха переходит через 0 °С, т.е. меняется от положительных значений к отрицательным и обратно. Такие воздействия испытывают материалы покрытий автомобильных дорог, гидротехнических сооружений, мостов и других конструкций транспортных объектов.

Находящаяся в открытых порах материала вода, замерзая, увеличивается в объеме на 9 %. При этом в порах материала возникают напряжения, значительно превышающие прочность материала (200 МПа). В результате повторяющихся циклов материал разрушается, теряя прочность (рис. 2.8).

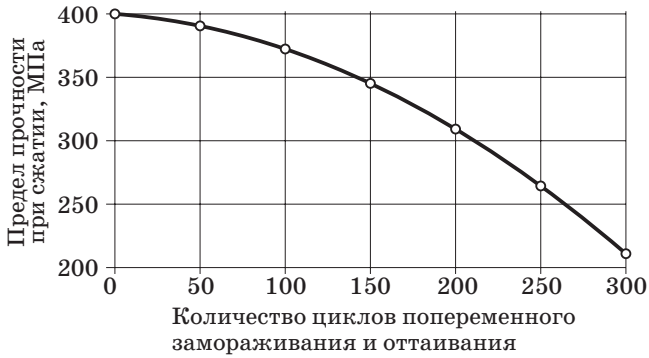


Рис. 2.8. Изменение прочности бетонных образцов после попеременного замораживания и оттаивания

Морозостойкость материала зависит от его структуры, формы и размера пор, степени заполнения их водой, наличия в них защемленного воздуха после водонасыщения, ионного состава вода — среда, температуры замораживания и многих других факторов.

Морозостойкость материала оценивается количеством циклов замораживания-оттаивания и соответственно маркой по морозостойкости *F*. За марку материала по морозостойкости

принимают наибольшее число циклов, которое выдерживают образцы материала при снижении прочности на сжатие не более 15 % и потери массы не более 5 %. Образцы после испытания не должны иметь видимых повреждений (трещин, выкрашивания).

От морозостойкости зависит долговечность строительных материалов в конструкциях, подвергающихся действию температурных изменений и воды. Марка по морозостойкости устанавливается проектом с учетом вида конструкции, условий ее эксплуатации и климата, который характеризуется среднемесячной температурой наиболее холодного месяца и числом циклов попеременного замораживания-оттаивания по данным многолетних метеорологических наблюдений.

Легкие бетоны, кирпич, керамические камни для наружных стен зданий обычно имеют марку по морозостойкости 15, 25, 25. Однако бетон, применяемый в строительстве мостов и дорог, должен иметь марку 50, 100, 200, а гидротехнический бетон — 500.

Испытание морозостойкости материала в лаборатории проводят на образцах установленной формы и размеров. Перед испытанием образцы насыщают водой. После этого водонасыщенные образцы замораживают в холодильной камере при температуре −15...20 °С. Извлеченные из камеры образцы оттаивают в воде с температурой 20 °С. Для бетонов дорожных и аэродромных покрытий, работающих в тяжелых эксплуатационных условиях, насыщение и оттаивание производят в 5%-ном растворе хлористого натрия.

Требуемое число циклов попеременного замораживания-оттаивания $n_{тр}$ определяют по формуле

$$n_{тр} = T_{сл} n_{кл} K_{з}, \qquad (2.26)$$

где $T_{сл}$ — срок службы сооружения; $n_{кл}$ — среднегодовое число циклов замораживание-оттаивание климатического района эксплуатации; $K_{з}$ — коэффициент запаса по морозостойкости.

Теплофизические свойства. Поведение строительных материалов под воздействием тепловых факторов определяется их теплопроводностью, теплоемкостью, термической стойкостью, огнестойкостью и огнеупорностью.

Теплопроводность — свойство материала передавать тепловой поток через свою толщу. Это свойство является главным для теплоизоляционных материалов; оно также очень важно для устройства земляного полотна и дорожных одежд автомобильных дорог.

Это явление возникает, когда на противоположных поверхностях слоя материала существует разность температур, например на внешней и внутренней поверхностях стены здания.

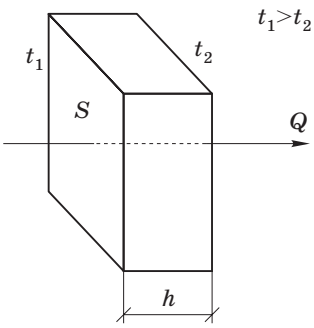


Рис. 2.9. Схема к определению коэффициента теплопроводности

Количество теплоты, прошедшее через стену толщиной h, площадью S в течение времени z при разности температур на противоположных поверхностях Δt, будет равно (рис. 2.9):

$$Q = \lambda \frac{S(t_1 - t_2)}{h} z, \qquad (2.27)$$

где λ — *коэффициент теплопроводности*, который показывает количество теплоты, проходящее через слой материала толщиной 1 м, площадью 1 м^2 при разности температур на противоположных поверхностях 1 °С.

Тепловой поток проходит через твердый «каркас» и воздушные поры материала. Теплопроводность воздуха (0,023 Вт/(м · °С)) значительно меньше, чем у твердого вещества, из которого состоит «каркас» строительного материала. Например, для бетона $\lambda = 1{,}2...1{,}5$ Вт/(м · °С). Поэтому увеличение пористости материала является основным способом уменьшения теплопроводности.

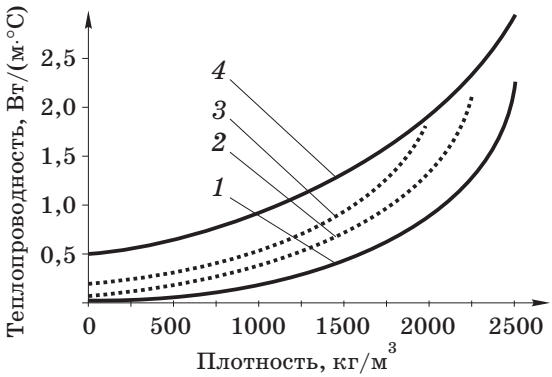


Рис. 2.10. Зависимость теплопроводности от средней плотности и влажности материалов:
1 — сухие материалы; *2*, *3* — материалы с разной влажностью; *4* — материалы, насыщенные водой

На практике о теплопроводности удобно судить по средней плотности материала и его влажности (рис. 2.10). Известна также формула В.П. Некрасова, связывающая теплопроводность λ со средней плотностью материала ρ_0:

$$\lambda = 1{,}16\left(\sqrt{0{,}0196 + 0{,}22\rho_0^2} - 0{,}16\right). \qquad (2.28)$$

Точное значение λ определяют для каждого материала экспериментально.

Влага, попадающая в поры материала, увеличивает его теплопроводность, так как теплопроводность воды (0,58 Вт/(м · °С)) в 25 раз больше, чем теплопроводность воздуха. Замерзание воды в порах с образованием льда еще больше увеличивает λ, так как теплопроводность льда равна 2,3 Вт/(м · °С), т.е. в четыре раза больше, чем у воды.

При одной и той же пористости теплопроводность материалов тем меньше, чем мельче поры, так как в крупных порах возможно движение воздуха и передача тепла конвекцией.

В табл. 2.4 приведены коэффициенты теплопроводности некоторых строительных материалов.

Таблица 2.4

Коэффициент λ строительных материалов

Материал	Плотность материала, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м · °С)
Бетон	2000...2500	1,2...1,5
Вода	1000	0,58
Воздух	—	0,023
Гранит	2600...2800	2,92
Древесина:		
вдоль волокон	400...700	0,34
поперек волокон	—	0,17
Кирпич	1600...1900	0,85
Минеральная вата	200...400	0,06...0,09
Сталь	7860	58

Теплоемкость — это способность материала аккумулировать теплоту при нагревании и выделять ее при остывании.

Теплоемкость C материала измеряется количеством теплоты, необходимым для нагревания этого материала на 1 °С:

$$C = \frac{Q}{T_2 - T_1}, \tag{2.29}$$

где Q — количество теплоты, израсходованное на нагревание, Дж; $T_2 - T_1$ — разность температур в конце и начале нагревания, °С.

В системе СИ теплоемкость измеряется в Дж/К.

Удельной теплоемкостью c материала называется количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг материала на 1 °С (1 К). Это теплоемкость материала c, отнесенная к его массе m:

$$c = \frac{Q}{m\left(T_2 - T_1\right)}. \tag{2.30}$$

В системе СИ удельная теплоемкость измеряется в Дж/(кг · К).

Наибольшую удельную теплоемкость имеет вода (4200 Дж/(кг · К)), поэтому с повышением влажности матери-

алов их теплоемкость возрастает. У органических материалов удельная теплоемкость выше, чем у неорганических: древесина — 2420...2750 Дж/(кг · К), бетоны, кирпич, каменные материалы — 750...940, сталь — 500 Дж/(кг · К).

Численные характеристики теплоемкости используют при расчете теплоустойчивости ограждающих конструкций. Кроме того, значения теплоемкости необходимы для расчета затрат на топливо и энергию на разогрев материалов и конструкций в различных технологических процессах.

Термическая стойкость — это свойство материала не растрескиваться при резких и многократных изменениях температуры. Она зависит от степени однородности материала и от способности каждого компонента к тепловому расширению, оцениваемой *коэффициентом линейного расширения*.

Коэффициент линейного расширения показывает удлинение 1 м материала при нагревании его на 1 °С. Чем меньше величина этого коэффициента и выше однородность материала, тем выше его термическая стойкость и большее количество циклов резких смен температуры он способен выдержать без нарушения своей сплошности.

Для цементного бетона линейный коэффициент теплового расширения равен $(10...14) \cdot 10^{-6}$, для древесины вдоль волокон — $(3...5) \cdot 10^{-6}$, для стали — $(11...12) \cdot 10^{-6}$. При сезонном изменении температуры окружающей среды и материала на 50 °С относительная температурная деформация достигает 0,5...1 мм на 1 м пог.

Термическое расширение является упругим и полностью обратимым. В основе возможного разрушения структуры лежат явления, под влиянием которых в материале возникают напряжения. Это связано либо с наличием градиента температур, либо с влиянием изотропии коэффициента теплового линейного расширения. В обоих случаях возникновению и развитию внутренних напряжений в материале благоприятствует отсутствие условий для свободного изменения объема элементов конструкции.

Термическая стойкость материала тем выше, чем меньше коэффициент его температурного расширения. Природные

каменные материалы из мономинеральных горных пород (например, мрамор) более термостойки, чем породы, сложенные из нескольких минералов (например, гранит).

Огнестойкость — это способность материала не гореть. По степени огнестойкости — способности противостоять действию высоких температур, развивающихся в условиях пожара (до 1000 °С), материалы могут быть:

- несгораемые (бетон, кирпич, гранит, сталь деформируются незначительно либо после значительного повышения температуры, но не горят);
- трудносгораемые (асфальтобетон, пропитанная антипиренами древесина, фибролит тлеют, но после удаления источника огня не горят);
- сгораемые (дерево, пластмассы, их необходимо защищать от возгорания, применять антипирены).

Огнеупорность — способность материала противостоять, не расплавляясь, действию высоких температур. Огнеупорность материала характеризуется температурой, при которой образец стандартных форм и размеров при нагревании в печи по заданному режиму размягчится и, оседая, коснется своей вершиной подставки, на которой он стоит.

Материалы с огнеупорностью более 1580 °С называются *огнеупорными* (динасовые, шамотные, хромомагнезитовые и др.). Огнеупорность шамотных материалов составляет 1610...1730 °С, динасовых — 1700 °С, хромомагнезитовых (обожженных) — не ниже 2000 °С.

Огнеупорные материалы применяют для внутренней футеровки промышленных печей.

Акустические свойства. Акустические свойства характеризуют способность материалов поглощать или проводить звук сквозь свою толщу. Знание этих свойств востребовано при проектировании промышленно-гражданских зданий, залов театров, кинотеатров, звукоограждающих конструкций на участках улиц и загородных автомобильных дорог.

При попадании звуковой волны на ограждающую поверхность звуковая энергия отражается, поглощается и частично проходит сквозь ограждение.

Звукоотражение. Отражение звуковой волны от поверхности материала зависит от ее состояния (гладкая, шероховатая) и пористости самого материала. Материалы с гладкой поверхностью отражают бóльшую часть падающей звуковой волны.

Звукопоглощение. Если поверхность материала имеет открытую пористость, то звуковые колебания, входя в поры, поглощаются материалом и не отражаются. Физика «гашения» звука пористым телом состоит в следующем. Звуковые волны, проникая в поры материала, создают колебания содержащегося в них воздуха, при этом значительная часть звуковой энергии растрачивается. Сжатие воздуха в порах и его трение об их стенки вызывает разогрев. Таким образом, кинетическая энергия звуковых колебаний преобразуется в тепловую, которая рассеивается в среде.

Значительному гашению звука способствует деформирование пористого скелета звукопоглощающего материала. Это особенно заметно в пористо-волокнистых материалах с открытой сообщающейся пористостью при ее общем объеме не менее 75 %.

Характеристикой поглощения звуковой энергии является коэффициент звукопоглощения:

$$K_{\text{погл}} = \frac{E_{\text{погл}}}{E_{\text{пад}}}, \qquad (2.31)$$

где $E_{\text{погл}}$ — количество поглощенной звуковой энергии; $E_{\text{пад}}$ — количество падающей на ограждение звуковой энергии.

Звукопроводность. Звукоограждающая конструкция тем меньше проводит звук, чем больше его толщина и масса: энергии звуковых волн не хватает, чтобы пройти сквозь нее.

Качество звукоизоляционных ограждений оценивают с помощью коэффициента звукопроводности:

$$K_{\text{пров}} = \frac{E_{\text{прош}}}{E_{\text{пад}}}, \qquad (2.32)$$

где $E_{\text{прош}}$ — количество звуковой энергии, прошедшей через материал ограждения.

Создание качественных звукоограждающих конструкций основано на двух физических явлениях: отражении звуковых волн от поверхности ограждения и поглощении звуковых волн материалом ограждения.

В качестве звукоизоляционных материалов применяют стекловату, древесные волокна, засыпки из пористых зерен (керамзита, шлака и др.), иногда используют штучные активные звукопоглотители: пластины, цилиндры и т.п. Плиты (или рулоны) из звукопоглощающих материалов покрывают снаружи гидрофобной стеклотканью. Эффективны также звукопоглощающие газонаполненные пластмассы (пенополиуретан, пенополивинилхлорид и др.) или штучные плитки из губчатой резины.

2.3.3. Химические свойства

Химические свойства материалов характеризуют степень активности материала и его способность к химическому взаимодействию с реагентами внешней среды, а также способность сохранять постоянство состава и структуру в эксплуатационный период.

Большинство строительных материалов проявляет активность при взаимодействии с кислотами, щелочами, агрессивными газами и другими средами.

Постепенное или быстрое изменение структуры и ее разрушение под влиянием агрессивных химических и электрохимических процессов в материале называют ***коррозией***.

Некоторые материалы склонны к самопроизвольным химическим изменениям даже в условиях инертной внешней среды, что объясняется неустановившимся равновесием внутренних химических связей. Химические превращения протекают также во время технологических процессов производства и применения материалов.

К основным химическим свойствам материалов относятся: растворимость, кристаллизация, коррозионная стойкость, атмосферостойкость.

Растворимость — способность вещества в смеси с одним или несколькими другими веществами образовывать однород-

ные устойчивые системы — растворы (например, раствор солей в воде). В растворах все компоненты находятся в микродисперсном состоянии: они равномерно распределены в объеме в виде отдельных молекул, атомов, ионов. Растворимость материала изменяется в зависимости от температуры и состава растворяемых компонентов.

Мерой растворимости является концентрация раствора при данной температуре и давлении. Растворение одного компонента в другом происходит в некоторых пределах изменения концентраций. По концентрации растворимого вещества растворы подразделяются на *насыщенные, перенасыщенные* и *ненасыщенные*. Различные материалы обладают разной растворимостью. Так, например, растворимость двуводного гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) составляет 2 г/л, гидросиликата кальция ($CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$) — всего лишь 0,07 г/л.

Стойкость бетонных конструкций, находящихся в воде (например, гидротехнических сооружений), зависит от растворимости компонентов цементного камня.

Кристаллизация — процесс образования кристаллов из паров, растворов, расплавов, т.е. переход из одного состояния (в основном, газообразного, жидкого) в другое — твердое.

Кристаллизация начинается при достижении некоторого предельного условия, например, переохлаждения жидкости, ее перенасыщения другим химическим веществом. Первая стадия кристаллизации — возникновение мелких кристалликов — центров кристаллизации (иногда протекает мгновенно). Кристаллики растут, присоединяя атомы или молекулы из жидкости или парообразной смеси. В процессе кристаллизации неизбежно возникают микродефекты в образующейся структуре.

Кристаллизация по-разному влияет на прочность образующихся структур материала. Например, кристаллизация затворенного водой цемента обеспечивает рост прочности образующегося цементного камня. Кристаллизация воды, замерзающей в капиллярах цементного камня, вызывает разрушение его структуры.

Коррозионная (химическая) стойкость — свойство материала сопротивляться коррозионному воздействию химиче-

ски активной жидкости, газообразной среды или физических воздействий в виде облучения, электромагнитных полей.

При воздействии указанных факторов в структуре материала происходят необратимые изменения, что вызывает снижение его прочности и преждевременное разрушение конструкции.

Снижение коррозионной стойкости вяжущих материалов (цемента, извести, гипса) зависит не только от их состава и структуры, но и от тонкости измельчения, т.е. их удельной поверхности.

Удельная поверхность ($см^2/г$) — суммарная поверхность всех частиц единицы массы порошкообразного материала. Удельная поверхность тонкоизмельченных материалов достигает больших значений (например, для портландцемента она составляет 2500...3000 $см^2/г$). Чем она больше, тем быстрее частицы цемента взаимодействуют с водой и, соответственно, быстрее твердеет цемент.

Основными агрессивными факторами, вызывающими коррозию строительных материалов, являются: пресная и минерализованная вода, растворенные в воде газы (CO_2, NO_2, SO_2, SO_3) на дорогах; на промышленных предприятиях коррозию строительных материалов часто вызывают более сильные реагенты: растворы кислот и щелочей, расплавленные материалы и горячие газы.

Металлы и сплавы подвергаются коррозии под действием сред, не проводящих электрический ток (например, некоторых газов при высокой температуре, веществ, содержащих органические кислоты). Такую коррозию металлов называют *химической*.

Чаще металлы (в том числе стальная арматура железобетонных конструкций) корродируют в средах, проводящих электрический ток — водных растворах солей, кислот, щелочей. В этом случае возникает *электрохимическая коррозия*.

Особым видом коррозии является *биокоррозия* — разрушение материалов под действием живых организмов (грибов, микробов). Биокоррозия — это не только гниение органических материалов (например, древесины), но и разрушение бетона

и металла продуктами жизнедеятельности поселившихся на них микроорганизмов.

Атмосферостойкость — способность органических вяжущих (битумов, дегтей, смол) и материалов на их основе (пластмасс, мастик, асфальтобетона, гидроизоляционных и теплоизоляционных материалов) противостоять действию атмосферных факторов внешней среды: температуры и влажности воздуха, солнечной радиации, осадков, различных газов.

Изменение структуры и химического состава органических материалов под воздействием атмосферных факторов называется ***старением***. При этом уменьшается пластичность материалов, увеличивается их хрупкость.

Комплексной (универсальной) характеристикой способности материалов сопротивляться одновременному или поочередному (в разной последовательности) воздействию механических, физических и химических факторов является их *долговечность* при работе в конструкции — свойство материала конструкции сохранять свою структуру и свойства в течение нормативного времени работы этой конструкции. Она характеризуется сроком службы конструкции.

О долговечности материалов судят по ухудшению их качества до определенного уровня (критического предела).

2.3.4. Технологические свойства

Технологические свойства отражают способность материала к восприятию технологических операций (переделов), выполняемых с целью изменения его формы, размеров, характера поверхности, плотности и др. Эти свойства определяются измерениями или визуальным осмотром с оценкой способности материала к формуемости (жесткие, пластичные и литые смеси), раскалываемости, шлифуемости, полируемости, дробимости, гвоздимости (удерживанию гвоздя при силовых воздействиях) и других показателей технологических качеств. Для оценки этих специфических свойств разработаны и, как правило, стандартизированы методы и приборы, определены температурные параметры и режимы для испытаний, скорости нагружения образцов и т.п.

Оценка свойств материалов производится на основе нормативных документов с использованием определенных оценочных критериев, связанных с математической обработкой результатов испытаний. К наиболее распространенным критериям относятся: среднее арифметическое значение, среднее квадратичное отклонение и коэффициент вариации.

2.3.5. Математическая обработка результатов испытаний

При определении какого-либо показателя свойства материала часто приходится сталкиваться с тем, что значения, получаемые при измерении этого показателя, неодинаковы. Например, прочность контрольных кубов одного замеса бетона почти всегда неодинакова. Эти отклонения могут быть обусловлены разными причинами:

- неточностью измерительных приборов или неправильностью методики измерений;
- ошибками работника, производящего измерения;
- неизбежными отклонениями свойств самого материала.

Первые две причины, так называемые *систематические ошибки*, могут быть устранены или учтены. Третья причина — *случайные ошибки*, которые складываются из множества неконтролируемых причин: неоднородности материала, различий в его технологической обработке и т.п. Полностью исключить влияние случайных ошибок невозможно. Такие ошибки вызывают отклонения при измерении в обе стороны от истинного значения, обычно подчиняющиеся нормальному закону распределения. Суть его состоит в следующем:

- отклонения не могут иметь один и тот же знак, т.е. измеряемые значения бывают и больше, и меньше среднего значения;
- абсолютные значения отклонений ограничены какими-либо пределами для большинства результатов измерений;
- чем больше значение отклонения, тем реже оно встречается;
- если число измерений достаточно велико, то сумма положительных отклонений приблизительно равна сумме отрицательных.

Простейший способ оценки какого-либо свойства заключается в определении средних значений.

Среднее арифметическое значение — статистическая характеристика, описывающая одним числом результаты некоторого ряда измерений. Среднее арифметическое значение вычисляют по формуле

$$\overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}, \qquad (2.33)$$

где x_i — результат измерения какого-либо свойства материала; n — число измерений.

Среднее арифметическое дает представление о среднем значении измеряемой величины, но ее изменчивости, т.е. пределов колебания (варьирования) этой величины, не выражает. Чтобы судить об изменчивости измеряемой величины необходимо использовать другую характеристику — ***среднее квадратичное отклонение*** σ. Его выражают в тех же единицах, что и среднее арифметическое значение, и вычисляют по формуле

$$\sigma = \pm\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - \overline{X}\right)^2}, \qquad (2.34)$$

где $\sum\left(X_i - \overline{X}\right)^2$ — сумма квадратов отклонений всех измерений от среднего арифметического; n — число измерений.

Знак «плюс» или «минус» в формуле показывает, что отклонение может быть как в одну, так и в другую сторону от среднего арифметического.

Среднее квадратичное отклонение — одна из наиболее важных статистических характеристик. Однако его абсолютное значение не позволяет сравнить степень изменчивости изучаемого свойства у нескольких групп материалов.

Квадрат среднего квадратичного отклонения σ^2 называется ***дисперсией***.

На практике для характеристики разброса измерений часто используют понятие ***размах*** (***варьирование***) R, который

представляет собой разность между максимальным и минимальным значениями в ряду измерений:

$$R = X_{\max} - X_{\min}. \quad (2.35)$$

Размах используют главным образом при анализе результатов небольшого числа измерений (до 10), чтобы облегчить вычисление среднего квадратичного отклонения по формуле

$$\sigma = \frac{R}{d}, \quad (2.36)$$

где d — коэффициент, зависящий от числа измерений (табл. 2.5).

Таблица 2.5

Значения коэффицента *d*

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d	1,13	1,69	2,06	2,33	2,53	2,70	2,85	2,97	3,08

Показатель относительной изменчивости $K_в$ (%), называемый ***коэффициентом вариации***, вычисляют по формуле

$$K_в = \left(\frac{\sigma}{\overline{X}}\right)100. \quad (2.37)$$

Достоверность измерений показывает степень доверия к результатам измерений, т.е. вероятность отклонений измерений от действительных значений. Применительно к стандартным средствам измерения количество измерений заданной погрешности обусловливается нормативными документами.

2.4. Пути повышения качества дорожно-строительных материалов

Для оценки качества строительных материалов большое значение имеет знание их механических, физических, химических и технологических свойств. Сравнение (сопоставление) фактических значений этих свойств с требуемыми, которые указаны в государственных или отраслевых стандартах, объективно дает представление о качестве строительных материалов.

Стандарты на отдельные виды материалов и изделий периодически обновляются по мере развития соответствующих наук и технологий производства. Поэтому одной из приоритетных общих задач повышения качества материалов является применение новых прогрессивных стандартов. На втором месте стоит задача обеспечения получения структур материалов высокого качества.

Как известно, все строительные материалы характеризуются микро- и макроструктурой, которые в совокупности представляют единую монолитную структуру композиционного строительного материала. Как установлено, структура материала может быть оптимальной и неоптимальной (по И.А. Рыбьеву).

Структуру называют *оптимальной*, если:

- частицы в ней распределены по объему равномерно;
- отсутствуют (или имеются в незначительном количестве) дефекты структуры;
- все частицы покрыты непрерывной пленкой вяжущего необходимой толщины.

В случае, когда в материале нет вяжущей прослойки, условием оптимальности структуры является максимальная поверхность контактирования и взаимосвязи частиц твердой фазы.

Неоптимальными называют структуры, в которых отсутствует хотя бы одно из перечисленных обязательных условий.

Материалы с оптимальной структурой отличаются улучшенными показателями качества по сравнению с материалами с неоптимальной структурой.

И.А. Рыбьевым предложен универсальный метод проектирования оптимальных составов и структур искусственных строительных материалов. В основе этого метода лежат общие научные принципы создания оптимальных структур:

- достижение наиболее плотной упаковки полидисперсных частиц в объеме;
- обеспечение непрерывности вяжущего вещества на дисперсных твердых частицах или наиболее развитых поверхностей контакта между частицами твердой фазы;

- достижение минимального значения отношения массы жидкой среды к массе твердой фазы (обеспечение пленки вяжущего требуемой толщины);
- приближение проектного состава смеси к реальной технологии ее изготовления;
- придание смеси реологического состояния, соответствующего реальным технологическим параметрам и режимам;
- соблюдение стадийности проектирования состава смеси и возможность внесения оперативных поправок в производственных условиях.

Основными задачами в общей программе повышения качества дорожно-строительных материалов являются:

1. Разработка промышленных активационных методов и устройств для повышения качества песков, минеральных порошков, цементов, битумов, битумных эмульсий с использованием модифицированных материалов, позволяющих резко повысить сроки службы дорожных сооружений и снизить стоимость этих объектов (особенно при широком применении местного сырья и техногенных отходов производства).

2. Организация широкого производства щебня кубовидной формы узких фракций для устройства защитных слоев, тонкослойных асфальтобетонных и бетонных покрытий, бетонных конструкций мостовых сооружений.

3. Совершенствование работы производственных предприятий дорожной отрасли (АБЗ, ЦБЗ, полигоны, базы), основанное на полной автоматизации технологических процессов, позволяющей производить динамическое регулирование всех параметров и на этой основе оптимизировать производство выпускаемых смесей по любой целевой функции, например минимизации энергопотребления. Для выполнения такой работы должна быть разработана система энергетического аудита на указанных выше производственных предприятиях.

4. Разработка технологий получения и применения эффективных эмульсионных композиций для защиты от коррозии бетонных дорожных и мостовых конструкций.

Максимальная экономическая эффективность конгломератов оптимальной структуры устанавливается на основе расчетных данных, в частности путем сравнения приведенных за-

трат при оптимальной и неоптимальной структурах.

Экономическая эффективность конгломерата, изготовленного в заводских условиях, оценивается величиной приведенных затрат на единицу продукции, выраженной в рублях:

$$П = С + ЕК + Э, \quad (2.38)$$

где П — приведенные затраты, руб.; С — себестоимость годовой продукции на заводе; Е — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений (принимается равным не менее ставки рефинансирования Нацбанка); К — удельные капиталовложения в заводское производство конгломерата, равные сумме капиталовложений, отнесенной к объему выпускаемой продукции в год, руб.; Э — среднегодовые эксплуатационно-ремонтные расходы по поддержанию конгломератного материала и конструкции из него в нормальном состоянии, руб.

Понятно, что чем меньше приведенные затраты, тем выше экономическая эффективность производства конгломерата и конструкций из него.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Дайте определение термина «структура объекта».

2. Что понимают под терминами «макроструктура», «микроструктура» и «ультрамикроструктура» материала?

3. Как прочность материалов зависит от неоднородности их структуры?

4. Дайте определение термина «свойство материала».

5. На какие группы подразделяются свойства материалов?

6. Дайте определение термина «оптимальная структура материала».

7. Чем объясняется большое различие между теоретической и реальной прочностью материалов?

8. Назовите основные механические свойства строительных материалов.

9. Перечислите основные физические свойства строительных материалов.

10. Назовите основные оценочные критерии свойств материалов, связанные с математической обработкой результатов испытаний.

11. Назовите основные задачи по повышению качества дорожно-строительных материалов.

3 ПРИРОДНЫЕ КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

3.1. Общие положения

Природными каменными материалами называют материалы, полученные из различных горных пород путем их механической обработки (дроблением, раскалыванием, пилением, шлифовкой, плавлением и т.п.). После такой обработки природные каменные материалы почти полностью сохраняют физико-механические свойства горной породы, из которой были получены, без изменения первоначального химического состава. Изменяются лишь форма частиц (при дроблении), степень обработки поверхности (при шлифовании) и некоторые другие внешние качества.

Некоторые горные породы (песок, глина, гравий) применяются без специальной механической обработки.

Каменные материалы очень прочны, долговечны, огнестойки и, как правило, являются местным строительным материалом. В наше время для возведения несущих конструкций (стен, колонн, арок, куполов и др.) тяжелые плотные каменные материалы не применяются. Но, тем не менее, они широко используются при возведении дорог и аэродромов, мостов, гидротехнических сооружений, для облицовочных работ. Пористые каменные материалы применяются в конструкциях стен промышленных, общественных и гражданских зданий. Каменные материалы используются также для производства искусственных каменных материалов, минеральных вяжущих.

На протяжении тысячелетий для строительства, вначале примитивных сооружений, а затем более сложных и величественных (египетские пирамиды, греческие пантеоны, акведуки, арены, храмы), применялся простой и доступный строительный материал — природный камень.

В России широкая разведка камня в недрах земли началась в конце XIX в. с постройкой железных и шоссейных дорог и развитием градостроительства.

Значительный вклад в исследование методов определения качества природных каменных материалов внесли такие крупные ученые, как Н.А. Белелюбский, И.Г. Малюга, Н.К. Лахтин и др. Проведенные исследования имели большое общегосударственное значение, так как ранее считалось, что в России мало хороших каменных материалов и многие их виды привозились из других стран: гранит из Швеции и Финляндии, мрамор и вулканический пепел (пуццоланы) из Италии.

Особенно ценными были работы академиков В.А. Обручева, А.Е. Ферсмана и др.

С появлением искусственных каменных материалов (бетона, керамического и силикатного кирпича и др.) роль природного камня как объемно-штучного материала в строительстве значительно изменилась. В настоящее время его используют главным образом в качестве:

- заполнителя в строительных и дорожных бетонах,
- сырья для получения вяжущих веществ и минеральной ваты,
- теплоизоляционной облицовки зданий,
- местного строительного материала для кладки стен,
- балластного слоя при строительстве железных дорог,
- фильтрующего материала при устройстве дренажей.

Каменный материал является основным исходным сырьем для производства таких материалов, как портландцемент, известь, гипс, стекло и др.

Следует отметить, что месторождения горных пород, особенно высокопрочных, расположены крайне неравномерно. Поэтому при необходимости материалы из таких пород нужно перевозить по железной дороге из других, очень отдаленных мест. В результате только транспортные и погрузоразгрузочные расходы в 3–5 и более раз превосходят стоимость этих материалов на месте их получения. Поэтому для снижения расходов на дорожные работы и уменьшения стоимости строительства дорог применяют местные каменные материалы более низких классов по прочности и морозостойкости. Однако это требует соответствующего изменения конструкции дорожных одежд, предварительного решения вопроса о способах их

применения и экономически правильного обоснования такого решения.

Практикой установлено, что местные каменные материалы, даже низких классов по прочности, водо- и морозостойкости, могут и должны применяться для строительства дорог. Но использование материалов, не допускаемых СНиП для данной конструкции, возможно только при условии учета их недостатков при проектировании дороги и дорожной одежды, а также при проведении дополнительных мероприятий, которые или улучшат их свойства, или создадут более благоприятные условия для работы данных материалов в дорожной конструкции.

3.2. Главные породообразующие материалы горных пород

Горными породами называют плотные или рыхлые природные агрегаты* минералов.

Минералы — однородные по химическому составу и физическим свойствам природные тела.

Горные породы, состоящие из одного минерала, называются мономинеральными (например, мрамор), из нескольких — полиминеральными (например, гранит — сложный агрегат полевого шпата, кварца и слюды).

К настоящему времени изучены более 3000 минералов, но в образовании горных пород участвуют только около 50 из них, называемых *породообразующими*.

Минералы находятся в основном в твердом состоянии и обладают преимущественно кристаллическим строением; лишь небольшая их часть имеет аморфную структуру.

Многие минералы анизотропны, т.е. их строение не одинаково в различных направлениях, в результате чего по этим направлениям они обладают различными свойствами. В отличие от кристаллических тел, аморфные тела (например, опал,

* Агрегат (лат. aggrego — присоединяю) — совокупность отдельных минералов, составляющих одну горную породу.

стекло) изотропны и их физические свойства одинаковы по всем направлениям.

Каждый минерал имеет определенный химический состав и строение, от которых зависят его форма и свойства (плотность, твердость, спайность, излом, окраска, блеск).

Плотность минералов зависит от их химического состава. Наибольшее распространение имеют минералы с плотностью от 2 до 4 г/см^3. Численная величина плотности имеет практическое значение при оценке качества минерального сырья.

Твердость минералов характеризует их поверхностную прочность. Она определяется по десятибалльной шкале твердости Мооса (см. п. 2.3.1).

Спайность — способность минералов раскалываться по определенным направлениям с образованием гладких зеркальных поверхностей — плоскостей спайности. Одни минералы (например, слюда) легко расщепляются на тончайшие пластинки, у других это свойство проявляется плохо или совсем отсутствует. Спайность совместно с показателем твердости используется для предварительной оценки механических свойств материалов.

Излом — характеристика неровной поверхности раскола минерала. Различают виды раскола: ровный, ступенчатый, раковистый.

Окраска — важный диагностический признак минералов, она имеет большое значение для декоративной характеристики природного камня. Окраска зависит от присутствия в составе минерала красящих компонентов (хрома, железа, марганца и др.).

Блеск возникает в результате отражения световых лучей от поверхности минерала. Он является характеристикой декоративных или ювелирных достоинств минерала и имеет важное диагностическое значение.

В зависимости от химического состава минералы делятся на следующие основные классы: силикаты, оксиды, карбонаты, сульфаты.

Силикаты. Этот класс наиболее многочисленный — он включает до 500 минералов. Земная кора (до 16 км) на 75 % по

массе состоит из силикатов. Минералы этого класса, сходные по составу и строению, объединяются в следующие группы:

- полевые шпаты;
- железисто-магнезиальные силикаты;
- слюды;
- глинистые минералы.

Полевые шпаты — важнейшая группа самых распространенных породообразующих минералов, составляющих около 60 % массы земной коры. Различают две разновидности полевых шпатов: *плагиоклазы* — алюмосиликаты Ca и Na ($CaAl_2Si_2O_8$ и $NaAlSi_3O_8$) и *ортоклазы* — алюмосиликаты K ($KAlSi_3O_8$). Полевые шпаты имеют большую прочность. Эти минералы входят в состав многих горных пород и являются ценным сырьем (плавнями) в стекольной и керамической промышленности.

К ***железисто-магнезиальным силикатам*** относятся: *пироксены* (авгиты), *амфиболы* (роговые обманки, оливин). Эти минералы обладают большой плотностью, прочностью и вязкостью, однако под воздействием атмосферных факторов сравнительно легко разлагаются. Например, оливин, присоединяя воду, переходит в серпентин, увеличиваясь в объеме. Одной из разновидностей серпентина является *хризотиласбест* — сырье для асбестоцементной промышленности.

Слюды — алюмосиликатные минералы сложного химического состава, способные расщепляться на тонкие пластинки. Наиболее распространена белая калиевая слюда (мусковит) и черная магнезиальная (биотит). Слюды, входящие в состав горных пород, снижают их строительные свойства: в процессе выветривания расслоение слюд уменьшает прочность породы и способствует ее разрушению.

Глинистые минералы образовались на поверхности земли в процессе выветривания алюмосиликатных (полевошпатовых) минералов. К ним относятся *каолинит* — водный алюмосиликат $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, применяющийся в керамической промышленности, и *монтмориллонит* $[Al_2O_3 \cdot 4(SiO_2)_n \cdot 2H_2O]$.

Оксиды. Этот класс включает около 200 минералов, составляющих до 17 % массы земной коры. Один из самых рас-

пространенных минералов этого класса — кварц; к нему же относятся опал, оксиды железа и др.

Кварц — кристаллическая форма кремнезема (SiO_2), входит во многие горные породы. Содержание кварца в полиминеральных породах, например в граните, может доходить до 25 % и более, а в осадочных (кварцевые пески) — до 100 %.

Плотность кварца 2,65 г/см^3, твердость 7, прочность при сжатии очень высокая, (около 2000 МПа). Кварц стоек при истирании, химически неактивен: под действием кислот (кроме плавиковой) не разрушается, со щелочами при обычной температуре не взаимодействует. При нагревании до температуры 575 °С кварц из β-модификации переходит в α-модификацию, увеличиваясь в объеме примерно на 15 %, плавится при температуре 1710 °С, а при быстром остывании расплавленной массы образуется кварцевое стекло (аморфный кремнезем плотностью 2,3 г/см^3).

Аморфный кремнезем — ***опал*** ($SiO_2 \cdot nH_2O$) имеет твердость 5…6,5; плотность 1,9…2,5 г/см^3. В отличие от кварца обладает большой реакционной (химической) способностью.

Карбонаты. Широко распространены в природе и составляют 1,7 % от массы земной коры. Этот класс включает минералы, представляющие собой соли угольной кислоты (H_2CO_3): кальцит, магнезит и доломит.

Кальцит — карбонат кальция ($CaCO_3$), плотность 2,6…2,8 г/см^3, твердость 3, слабо растворим в воде (0,03 г/л). Он относится к числу распространенных минералов. При содержании в воде углекислого газа переходит в бикарбонат кальция $(CaHCO_3)_2$, который в воде растворим в 100 раз больше, чем $CaCO_3$. Кальцит образует горные породы: кристаллические известняки и мраморы.

Кальцит может быть и не в виде кристаллов; в таком виде он образует мел и плотные известняки.

Магнезит ($MgCO_3$) встречается в природе реже, чем кальцит. Его плотность 3 г/см^3, твердость 4…4,5.

Доломит ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$) имеет плотность 2,8 г/см^3, твердость до 4. Он слагает осадочную горную породу того же названия.

Сульфаты. Составляют 0,1 % от массы земной коры. Этот класс насчитывает более 270 минералов, из которых наиболее распространены гипс и ангидрит.

Гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) — минерал плотностью 2,3 г/см^3, твердостью 1,5…2, растворим в воде. При обезвоживании гипс переходит в ***ангидрит*** ($CaSO_4$) с большей плотностью (2,8…3,0 г/см^3) и твердостью 3…3,5. При длительном контакте с водой ангидрит снова переходит в гипс, увеличиваясь в объеме до 30 %.

3.3. Классификация горных пород

Известно около 1000 видов горных пород. По происхождению (генезису) они делятся на три группы (рис. 3.1):

- изверженные (магматические);
- осадочные;
- метаморфические (видоизмененные).

Группы, в свою очередь, делятся на подгруппы, в каждой из которых представлены основные виды горных пород.

Ниже кратко рассмотрены вопросы образования тех или иных групп горных пород и даны характеристики некоторых ее представителей.

3.3.1. Изверженные (магматические) горные породы

Данные породы образовались в результате застывания расплавленной магмы глубоко под землей или на ее поверхности.

Породы, которые образовались в толще земной коры, называются интрузивными (глубинными), а на поверхности — эффузивными (излившимися). Различные условия остывания магмы в глубине и на поверхности земной коры обусловливают различные свойства изверженных горных пород.

Интрузивные (***глубинные***) изверженные породы образовались в условиях высокого давления и медленного равномерного охлаждения. В этих условиях происходит полная кристал-

Рис. 3.1. Классификация горных пород

лизация магмы и образуются плотные полнокристаллические породы. К ним относятся гранит, сиенит, диорит, габбро.

Гранит — наиболее распространенная глубинная магматическая горная порода, состоящая в основном из кварца, силикатов и алюмосиликатов. Его водопоглощение не превышает 1 %, он обладает высокой морозостойкостью и теплопроводностью; истинная плотность 2,7 г/см^3, средняя — 2,6 г/см^3, высокая прочность (120...200 МПа), устойчив против выветривания. Однако граниты не огнестойки — утрачивают прочность при температуре выше 800 °С.

Из гранитов можно изготавливать все виды каменных материалов: колотые, дробленые, молотые, тесаные и полированные. Красивая окраска некоторых видов гранитов позволяет использовать их для архитектурно-отделочных работ в зданиях, станциях метро, для укрепления берегов рек (набережные).

Крупные месторождения гранита находятся в Карелии, на Кавказе, Урале, в Прибайкалье, Украине, на юге Беларуси (Микашевичи, Глушковичи).

Габбро — более прочная, чем гранит, горная порода (прочность при сжатии — до 350 МПа) средней плотностью от 2,9 г/см^3 до 3,2 г/см^3. Наряду с высокой прочностью, обладает большой вязкостью, что несколько затрудняет его разработку. Габбро хорошо полируется. В дорожном строительстве габбро, как и гранит, применяется в производстве различных строительных материалов.

Эффузивные **(*излившиеся*)** магматические горные породы изливались на поверхность Земли в виде лавовых потоков при быстром охлаждении, снижении давления и удалении газов и паров, растворенных в магме. В таких условиях образуются породы со скрытокристаллической структурой, а иногда даже аморфной с большой пористостью. К породам этой подгруппы относятся базальт, порфир, диабаз, андезит.

Базальт — самая распространенная излившаяся горная порода серого и черного цвета. Плотность 2,7...3,3 г/см^3, предел прочности при сжатии от 110 до 500 МПа (в среднем 200...250 МПа). Базальты ввиду большой твердости и хрупкости трудно обрабатываются, но хорошо полируются.

Применяются, главным образом, в виде бутового камня и щебня для бетонов, в дорожном строительстве (для мощения дорог и улиц), в гидротехническом строительстве. Базальты являются исходным материалом для изготовления литых каменных материалов и высококачественной минеральной ваты.

Диабаз — мелкозернистая порода черного цвета. Характеризуется высокой прочностью, вязкостью и низкой истираемостью. Прочность диабаза составляет 300…450 МПа, плотность — около 3,1 г/см^3. Порода хорошо полируется и раскалывается при ударах на куски сравнительно правильной формы, поэтому из нее часто изготавливают высококачественную брусчатку для дорожного строительства.

Диабаз и базальты широко используются в строительстве. Нередко их переплавляют в литой камень — *базальтин* и изготовливают из него трубы, химическое оборудование и аппаратуру высокой кислотостойкости и прочности (до 800 МПа), большой долговечности.

Излившиеся обломочные породы — рыхлые или цементированные — легкие пористые материалы. Они характеризуются малой теплопроводностью и достаточной морозостойкостью. В подгруппу рыхлых обломочных пород входят вулканический пепел и песок, пемза.

Вулканический пепел и *песок* — наиболее мелкие частицы лавы, обломки отдельных минералов, выброшенные при извержении вулкана. Размеры частиц пепла колеблются от 0,1 до 2 мм.Происхождение пепла объясняется размельчением лавы при взрывных ее выбросах.

Вследствие быстрого остывания эти горные породы имеют аморфную (стеклообразную) структуру и, следовательно, обладают определенной химической активностью, благодаря чему способны к гидравлическому твердению при добавлении извести или цемента. Это их свойство использовали еще в Древнем Риме для придания извести водостойкости (добавляли, например, пепел Везувия).

Пемза — очень пористая (до 80 %) легкая порода в виде кусков размером 5…100 мм, плотностью 0,3…0,7 г/см^3 и теплопроводностью 0,14…0,23 Вт/(м·К). Прочность пемзы невелика — 2…4 МПа, но этого вполне достаточно для ее исполь-

зования при производстве легких бетонов. Кроме того, пемза используется в молотом виде как добавка к цементам и в качестве абразивного порошка (твердость пемзы около 6).

Наиболее типовым представителем ***обломочных цементированных горных пород*** является вулканический туф и его наиболее уплотненный вид, называемый *трассами*.

Вулканический туф — горная порода, образовавшаяся из вулканических пеплов, которые сцементировались в результате спекания или природной цементации. Это пористая порода (пористость 30...40 %) в основном с замкнутыми порами, что обусловливает ее высокую морозостойкость. Средняя плотность 0,8...1,8 г/см^3, теплопроводность — не более 0,62 Вт/(м · К).

Туфы легко обрабатываются, распиливаются, шлифуются, но не полируются. Крупнейшее месторождение — в Армении (продукты ныне потухшего вулкана Арарат).

Туфы используют как облицовочный материал, для изготовления стеновых блоков, а также в виде щебня для легких бетонов. В тонкомолотом виде туф используют как добавку к цементам.

3.3.2. Осадочные (вторичные) горные породы

Осадочные (вторичные) горные породы образовались в результате разрушения первичных пород под влиянием изменения температуры, действия ветра и воды. Продукты разрушения перемещались водными потоками на значительные расстояния, осаждались в местах спокойного течения воды, морях, озерах, переносились ветром или ледниками. Некоторые минералы и продукты их разрушения растворялись в воде и впоследствии осаждались из водного раствора, почему и получили название *осадочные*. Характерной особенностью осадочных горных пород является слоистость (залегание пластами), возникающая при постепенном образовании пласта из механических осадков или органогенных отложений. Отдельные слои отличаются один от другого окраской, составом и свойствами.

Для многих осадочных пород характерна также большая пористость, наличие окаменелых остатков ранее живших организмов или их отпечатков.

В зависимости от условий образования осадочные породы делятся на три основные группы:

- механические отложения;
- органические отложения;
- химические осадочные горные породы (химические осадки).

К **механическим отложениям** относятся рыхлые и цементированные породы.

Рыхлые осадочные горные породы — скопление продуктов выветривания скальных горных пород. Вследствие этого их минеральный состав аналогичен минеральному составу исходных материнских пород. По крупности окатанных обломков рыхлые горные породы условно делят на валунный камень, гальку, гравий и песок.

Валунный камень — грубоокатанные, преимущественно округлой формы, обломки скальных горных пород размером более 100 мм. Качество валунного камня обусловливается минеральным составом породы, крупностью и формой обломков, а также степенью выветривания. Лучший по качеству (свежести) — валунный камень из магматических пород, находящийся длительное время под слоем грунта или под водой, где он лучше защищен от выветривания. Валунный камень на поверхности земли более затронут выветриванием, вследствие чего его качество ниже из-за большого количества отходов при предварительной сортировке собранного валуна и дальнейшей его колке или дроблении.

Валуны размером до 250 мм называют сырцом, так как их можно применять для дорожных работ (например, мощение) без дополнительной обработки. Более крупные валуны используют для получения каменного материала (шашки, щебня) путем раскалывания и дробления.

Галька представляет собой окатанные водой обломки горных пород размером от 100 до 70 мм. Она обладает теми же свойствами, что и мелкий валунный камень. Гальку применяют для устройства оснований, дренажей, но чаще измельчают и используют как щебень.

Гравий — рыхлое скопление окатанных обломков исходных горных пород размером от 70 до 5 мм.

Гравийно-песчаные месторождения характеризуются значительными колебаниями гранулометрического состава и загрязненности. В том случае, когда гравийный материал содержит песка более 50 %, его называют гравийно-песчаным. Крупный рядовой гравий состоит из зерен размером 5…70 мм, а средний рядовой — 5…40 мм.

Гравийно-песчаные заводы в процессе рассева, дробления, промывки выпускают фракционированный гравий крупностью 20…70 мм, щебень — 5…40 мм за счет дробления валунов и крупного гравия, а также песок.

Песок — рыхлая зернистая порода, образовавшаяся в результате естественного разрушения горных пород, с зернами крупностью до 5 (3) мм. В песке иногда имеются частицы мельче 0,14 мм, которые называют пылевидными (0,14…0,005 мм) и глинистыми (мельче 0,005 мм). В зависимости от минерального состава различают пески: кварцевые (кварца более 90 %), кварцево-полевошпатовые, полевошпатовые (полевых шпатов более 90 %), кварцево-слюдистые (с содержанием чешуек слюды свыше 10 %), глауконитовые (с примесью железистых соединений), ракушечные, (содержат значительное количество обломков ракушек), гумозные (с содержанием органических соединений более 0,5 %) и др.

Наиболее прочными являются кварцевые пески. Они встречаются чаще других. Это объясняется тем, что при выветривании гранита кварц оказывается наиболее твердым (твердость 7) и химически стойким минералом, который разрушает соседствующие с ним минералы (полевые шпаты, слюду и др.). Зерна кварца лишь слегка окатаны при перемещении водой или ветром.

Форма и характер поверхности зерен песка зависит от условий образования: речной, озерный, морской, дюнный пески состоят из частиц округлой формы с гладкой поверхностью; ледниковый и овражный пески — из частиц угловатой формы с шероховатой поверхностью. Пески имеют истинную плотность около 2650 кг/м^3, насыпную плотность 1400...1800 кг/м^3

и пустотность в пределах 25...50 %. Пески являются также составной частью сырьевой смеси при производстве стекла, керамических материалов, силикатного кирпича, силикатного бетона и др

Глина — тонкодисперсный землистый материал, более чем на 50 % сложенный из частиц размером менее 0,01 мм, причем не менее 25 % из них имеют размеры менее 0,001 мм. Глины образовались при разрушении самого распространенного минерала — полевых шпатов.

Глины являются основным сырьем при производстве керамических материалов и используются как компонент сырьевой смеси при производстве цементов.

Цементированные механические осадочные породы образовались из рыхлых залежей под действием минерализованных вод и давления вышележащих слоев. К ним относятся песчаники, конгломераты, брекчии.

Песчаники состоят из зерен кварцевого песка, сцементированного природным цементом (например, карбонатом кальция $CaCO_3$, водным кремнеземом $SiO_2 \cdot nH_2O$, гипсом $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ и др.). В зависимости от цементирующего вещества песчаники называют известковыми, кремнистыми и т.д. Цвет их зависит от цвета цементирующего вещества.

Наибольшее применение в строительстве получили известковые и кремнистые песчаники. Известковые песчаники легче обрабатываются, их плотность составляет 1800...2400 кг/м^3, прочность при сжатии от 20 до 100 МПа. Кремнистые песчаники более стойкие и прочные, их плотность составляет 2300...2600 кг/м^3, прочность — 100...200 МПа, иногда выше.

Песчаники используют для возведения фундаментов, стен неотапливаемых зданий, подпорных стенок, тротуаров, особо стойкие — для облицовок; кроме того, их применяют для изготовления щебня для бетона, штучных камней для дорожного строительства.

Конгломераты (рис. 3.2, *а*) состоят из гравия и гальки, сцементированных природными цементами (кремнистыми, карбонатными, железистыми). Аналогичная порода, но состоящая из угловатых обломков горных пород, носит название

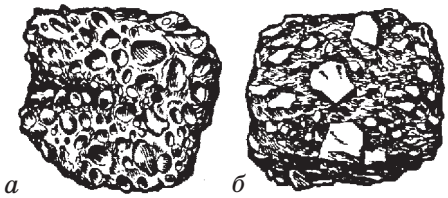


Рис. 3.2. Цементированные отложения:
а — конгломерат; *б* — брекчия

брекчии (рис. 3.2, *б*). Конгломераты и брекчии применяют как местный материал для получения щебня.

Органические отложения образуются в результате отложения отмерших организмов (ракушек, рачков и др.). К ним относятся широко распространенные в природе известняки, известняки-ракушечники, мел, состоящие в основном из карбоната кальция $CaCO_3$. Реже встречаются породы, состоящие из аморфного кремнезема $SiO_2 \cdot nH_2O$ — диатомиты и трепелы.

Известняки плотные — широко распространенная горная порода, состоящая в основном из кальцита $CaCO_3$. Кроме кальцита, они содержат примеси магнезита, глины, кремнезема. Цвет известняка (в зависимости от примесей) может быть белым, светло-серым, серовато-кремовым или желтоватым. Плотность известняков 2700…2760 кг/м^3, прочность при сжатии 250...300 МПа; твердость небольшая — 3…3,5, что позволяет легко добывать и обрабатывать известняк. В кислых средах, в том числе при воздействии углекислого газа, известняки нестойки.

Известняки издревле широко применяются при строительстве для возведения зданий и их облицовки; самый распространенный щебень для бетонов — известняковый; известняк — сырье для производства извести и цемента.

Мраморные известняки — переходные породы от плотных известняков к мраморам. Они имеют бóльшую, чем у известняков, плотность и прочность. Применяются для облицовки зданий.

Известняк-ракушечник — пористая порода, состоящая из раковин и панцирей моллюсков, сцементированных природным известковым цементом. Плотность ракушечника —

900…1800 кг/м^3, прочность при сжатии 0,4…12 МПа. Он имеет низкую теплопроводность, легко распиливается, благодаря чему его используют как местный стеновой материал в виде камней и блоков. Декоративные разновидности ракушечника применяются для облицовки.

Мергель — тесная природная смесь известняка с глиной плотного землистого сложения, средней плотностью 2100…2700 кг/м^3. Содержание $CaCO_3$ колеблется от 25 до 75 %. Мергель легко выветривается, неводостоек, неморозостоек. Применяется для производства извести, цемента, получения красок, замазок.

Мел — землистая горная порода, состоящая из мельчайших частиц раковин и скелетов морских микроорганизмов, представляет собой почти чистый кальцит $CaCO_3$. Пористость мела до 40 %, твердость 1. Используют мел при производстве извести, цемента, стекла и для приготовления красок и шпаклевок.

Диатомиты и *трепелы* — слабосцементированные или рыхлые землистые породы белого, серого или желтоватого цвета, в основном состоящие из аморфного кремнезема ($SiO_2 \cdot nH_2O$). Они образовались из диатомитового ила, накопившегося в морях и озерах, мельчайших диатомитовых водорослей, а также кремниевых скелетов морской микрофауны с примесью глины и ила. Трепел отличается от диатомита тем, что содержит мало или почти лишен органических остатков. Диатомиты и трепелы — легкие пористые породы (плотность 350…950 кг/м^3), обладающие весьма низкой теплопроводностью (0,15…0,20 Вт/(м · К)).

Диатомит и трепел содержат до 75…96 % активного кремнезема, поэтому они являются лучшей активной минеральной добавкой к вяжущим. Кроме того, они используются при производстве теплоизоляционных материалов.

В результате химических процессов — растворения минеральных веществ и последующего выпадения твердых веществ из растворов — образовались **химические осадочные горные породы**. Из таких осадочных пород в строительстве используют природный гипс, доломит, магнезит.

Гипс — мономинеральная горная порода (средняя плотность — 2200 кг/м^3, прочность при сжатии — 60…80 МПа).

Он состоит из минерала того же названия — $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ и небольшой примеси глины, песка, известняка. Основное применение — сырье для производства гипсовых вяжущих веществ и как добавка в производстве цемента.

Доломит — мономинеральная горная порода, состоящая в основном из минерала доломита ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$). Плотность 2,2…2,8 г/см^3, прочность от 50 до 200 МПа. Он используется как облицовочный материал и заполнитель для бетона.

Магнезит состоит из минерала магнезита ($MgCO_3$). Он имеет кристаллическую или аморфную структуру. Используется для получения магнезиального вяжущего — каустического магнезита, а также для производства огнеупорных материалов.

3.3.3. Метаморфические породы

Эти породы образовались в результате видоизменения магматических или осадочных горных пород под воздействием механических факторов, высокой температуры, высокого давления газов, горячих растворов химических элементов. При этом происходило глубокое изменение строения, а иногда и минералогического состава первоначальной породы.

Характерным представителем метаморфизма ***изверженных пород*** являются *гнейсы*, которые образовались из гранитов и сиенитов путем их видоизменения. Они могут иметь ленточное или сланцеватое строение. При этом вдоль слоев происходит резкое падение механических свойств, а в направлении, перпендикулярном сланцеватости, гнейсы мало отличаются от гранитов: их прочность при сжатии составляет 150…200 МПа; средняя плотность 2,4…2,8 г/см^3.

Сланцеватость облегчает добычу и переработку гнейсов, но при этом образуется много лещадки.

Гнейсы используются в виде плит для облицовки набережных, каналов, устройства тротуаров, кладки фундаментов. Из него изготавливают щебень, бутовый камень.

Представителями видоизменения (метаморфизма) ***осадочных горных пород*** являются мраморы, глинистые сланцы, кварциты.

Мраморы — широко распространенная горная порода, образовавшаяся из известняков в результате огромного многостороннего давления в условиях высоких температур и состоящая из плотно сросшихся между собой кристаллов кальцита ($CaCO_3$), иногда с примесью доломита ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$). Мраморы могут быть как чисто белые, так и самых разных цветов с характерным мраморовидным рисунком. Средняя плотность мраморов составляет 2600…2800 кг/м^3, прочность при сжатии — 50…300 МПа. Мраморы хорошо полируются.

Мрамор широко применяется как декоративный и отделочный материал для внутренних частей зданий. Для наружных облицовок его применять не рекомендуется, поскольку кальцит не стоек к действию влаги и кислотных оксидов, в том числе и CO_2, в большом количестве содержащихся в атмосфере современных городов. Не следует применять мрамор для полов с большой интенсивностью движения.

Мраморную крошку используют как заполнитель для цветных цементных и асфальтовых бетонов.

Глинистые сланцы являются продуктом метаморфизма глинистых пород. Они легко раскалываются на тонкие (2…8 мм) ровные плитки и применяются как один из самых долговечных кровельных материалов. Из глинистых сланцев изготавливают также плиты для внутренней облицовки и для полов.

Разновидностью сланцевых пород являются менилитовые (горючие) сланцы, которые состоят из аморфного кремнезема (40…70 %), органической массы (керогена) 18…30 % и глинистого вещества. Эти сланцы могут применяться для производства асфальтобетона и легких бетонов. Прочность менилитовых сланцев 30…70 МПа, плотность 2,3…2,5 г/см^3, пористость 3…10 %.

Кварциты — метаморфизированные кварцевые песчинки, состоящие из сросшихся между собой кристаллов кварца. Это стойкая к выветриванию, прочная (до 400 МПа) и твердая (7 по шкале Мооса) порода, но хрупкая и труднообрабатываемая. Они применяются в ответственных частях зданий и сооружений как облицовочный материал, в виде щебня для бетонов и в качестве сырья для получения кислотоупорных бетонов и огнеупоров.

3.4. Виды и марки изделий из природных каменных материалов

В зависимости от способа получения (происхождения) различают:

- дисперсные (рыхлые) природные и искусственные каменные материалы;
- грубообработанные в природной среде каменные материалы;
- штучные изделия из камня, получаемые специальной обработкой.

3.4.1. Дисперсные (рыхлые) природные и искусственные каменные материалы

К этой группе материалов относятся: галька, гравий, природный щебень (дресва), кварцевый песок, искусственный щебень, отходы производства (шлак, отработанные формовочные смеси).

Галька представляет собой окатанные в водной среде обломки горных пород размером 70…100 мм. Ее применяют для устройства дорожных оснований, дренажей, но чаще измельчают и используют как щебень в бетонах.

Гравий — зернистый сыпучий материал, состоящий из окатанных обломков размером 5…120 мм, получаемый рассевом природных гравийно-песчаных смесей.

Щебень — продукт дробления горных пород, гравия, валунов с зернами крупностью 5…120 мм.

Песок — зернистый сыпучий материал, состоящий из частиц размером менее 5 мм и получаемый рассевом природных гравийно-песчаных смесей или в виде отсевов при получении щебня на камнедробильных заводах.

3.4.2. Грубообработанные природные каменные материалы

К этой группе материалов относится валунный и бутовый камень.

Валунный камень состоит из грубоокатанных обломков горных пород размером более 100 мм, обработанных и перенесенных водой или ледником. По генезису может быть ледниковым, речным, морским, озерным.

Бутовый камень (бут) — крупные куски породы неправильной (рваной) формы размером 150…500 мм, полученные буровзрывным способом. Разновидность бутового камня — булыжный камень (до 300 мм). Бутовый камень применяют для кладки фундаментов, стен вспомогательных помещений, гидротехнических сооружений.

3.4.3. Штучные изделия из камня

Природный камень, доставленный из карьеров, подвергается распиливанию для получения штучных изделий: стеновых камней, стеновых блоков, кровельных плиток, шашек для мощения, брусчатки, бортового камня.

Для каждого конкретного строительства нормативно-техническими документами (ГОСТ, СТБ, СНиП и др.) рекомендуются определенные виды материалов и изделий из природного камня. Для возведения фундаментов, например, пригоден бутовый камень, пиленые и колотые камни из всех видов пород, а для кладки стен — камни (плиты), блоки из всех разновидностей известняков, доломитов, песчаников, вулканического туфа. Для наружной облицовки применяют плиты из гранита, диорита, габбро, базальта, кварцита; для внутренней отделки — плиты из мрамора, гипсового камня.

Стеновые камни получают из туфов и пористых известняков путем выпиливания из массива горной породы или распиловки блоков-заготовок. Каждый из таких камней заменяет в кладке 8–12 кирпичей.

Для монтажа *стеновых блоков*, масса которых составляет 0,5…1,5 т, а максимальный размер $3 \times 0{,}5 \times 1$ м, используют подъемные краны.

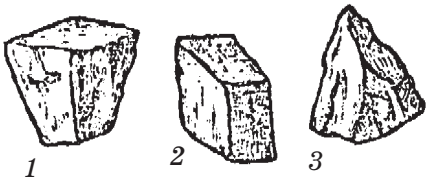


Рис. 3.3. Шашка:
1 — для мощения;
2, 3 — пакеляжная

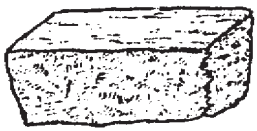


Рис. 3.4. Брусчатка

Кровельные плитки (*природный шифер*) размером от 250 × 150 до 600 × 350 мм и толщиной 4…8 мм получают раскалыванием и обрезкой глинистого сланца. Это самый долговечный (сотни лет) кровельный материал.

Природный камень в дорожном строительстве широко используется в виде бортового камня, брусчатки, для защитной облицовки мостовых опор, а также парапетных*, тротуарных плит.

Шашка для мощения (рис. 3.3) — грубоколотые камни неправильной формы, приближающиеся к призме или усеченной пирамиде. Используются для устройства дорожного покрытия.

Брусчатка (рис. 3.4) — колотые и тесаные бруски камня, близкие по форме к параллелепипеду и имеющие плоскую лицевую сторону в виде прямоугольника.

Бортовой камень (рис. 3.5) служит для отделения проезжей части дороги от тротуара.

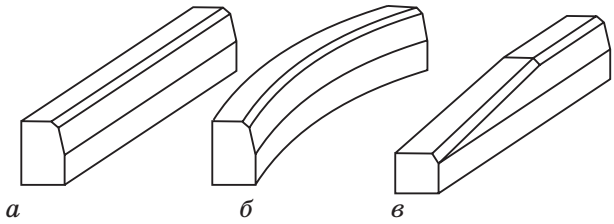


Рис. 3.5. Бортовой камень:
а — прямой; *б* — лекальный; *в* — для съездов

* Парапет (фр. parapet) – невысокая стенка, ограждающая мост, набережную.

Природные каменные материалы по средней плотности делятся на легкие (плотность менее 1800 кг/м^3) и тяжелые (плотность более 1800 кг/м^3). Легкие (вулканический туф, пемза, известняк-ракушечник) применяются в виде штучного камня и блоков для стен зданий, заполнителя для легкого бетона, теплоизоляционных материалов; тяжелые (гранит, сиенит и т.п.) — для несущих конструкций, дорог, мостов и т.п.

По прочности на сжатие каменные материалы делятся на следующие марки (кг/см^2):

- легкие: 4, 7, 10, 15, 25, 35, 50, 75, 100, 150, 200;
- тяжелые: 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200 и более.

По морозостойкости каменные материалы разделяют на марки: 10, 15, 25, 50, 100, 150, 200, 300 и 500. Высокую морозостойкость имеют плотные камни с равномерно-зернистой структурой.

В строительстве применяют каменные материалы следующих групп по водостойкости: с коэффициентом размягчения 0,6, 0,75, 0,9 и 1. Коэффициент размягчения камня, применяемого для гидротехнических сооружений и фундаментов, должен быть не менее 0,6, для наружных стен зданий — не менее 0,9.

При устройстве дорожных покрытий, полов, лестниц и т.п. важное значение имеют ***истираемость*** и ***износостойкость***. Мелкокристаллические материалы при истирании становятся слишком скользкими, поэтому для дорожных покрытий, полов, лестниц следует применять среднезернистые материалы, которые при истирании остаются немного шероховатыми. При выкрашивании крупных зерен в процессе истирания в камне образуются выбоины.

Теплостойкость каменного материала зависит от его минералогического состава. Некоторые материалы при повышенной температуре разлагаются (гипс при 100 °С, известняк при 900 °С), другие (например, гранит, порфиры) растрескиваются при пожаре из-за различного теплового расширения составляющих их минералов.

3.4.4. Особенности применения каменных материалов в дорожном строительстве

Следует отметить, что большинство природных каменных материалов не могут использоваться для целей дорожного строительства в их естественном состоянии, без применения специальных методов улучшения. Например, во всех песках наблюдается недостаток фракций крупностью 1,25...5,0 мм и избыток фракций крупностью 0,315...1,25 мм. Это приводит к тому, что при приготовлении асфальтобетонных смесей очень трудно получить зерновой состав минеральной части, удовлетворяющий требованиям максимальной плотности. В связи с тем что улучшение гранулометрического состава песков путем их рассева на отдельные фракции и последующего смешивания в других пропорциях в производственных условиях пока неосуществимо, приходится прибегать к увеличению расхода минерального порошка или добавлять в песок отсевы дробления горных пород.

Зерновые составы песчано-гравийных смесей почти всех белорусских месторождений также не отвечают требованиям максимальной плотности и нуждаются в дополнительных затратах на их обогащение.

Гравийный материал в своем естественном виде не всегда может использоваться для устройства оснований для дорожных одежд и приготовления асфальтобетонных смесей, так как во многих случаях не соответствует своему назначению по зерновому составу, часто содержит зерна слабых пород и имеет загрязненную поверхность. Поэтому возникает необходимость в сортировке по зерновому составу, дроблении крупных фракций, обогащении по прочности, мойке и активации поверхности.

Существенное влияние на свойства каменных материалов могут оказывать технологические факторы, в частности процесс их высушивания и нагрева в сушильных барабанах при приготовлении асфальтобетонных смесей. При определенных условиях нагрев каменных материалов до технологических температур может приводить к значительному уменьшению их прочности (рис. 3.6). Основная причина этого явления — возникающие при нагреве температурные напряжения. На

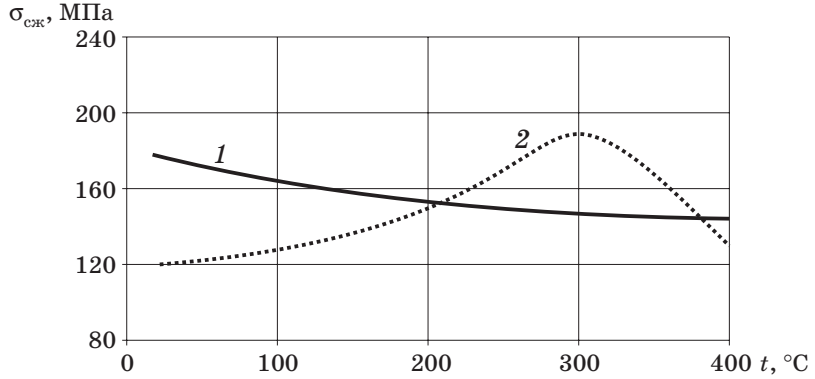


Рис. 3.6. Зависимость пределов прочности при сжатии горных пород от температуры нагрева (М.И. Карлович): *1* — железистый кварцит; *2* — мелкозернистый гранит

основании исследований, проведенных в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ) М.И. Карловичем, определены предельно допустимые (критические) температуры и скорости нагревания различных каменных материалов, что является важным в производстве асфальтобетонных смесей.

3.5. Добыча и переработка природных каменных материалов

Горные породы становятся дорожно-строительными материалами после их добычи из земной коры и переработки.

Скопления горных пород в земной коре называют ***месторождениями***. Разрабатываемые месторождения горных пород называют ***карьерами***.

Для решения вопроса о целесообразности разработки месторождения производят разведку для установления:

- запасов горной породы;
- ее строительно-технических свойств;
- рентабельности разработки, которая будет зависеть от верхнего наносного слоя (вскрыши), толщины слоя породы, способа разработки и транспортирования горной породы.

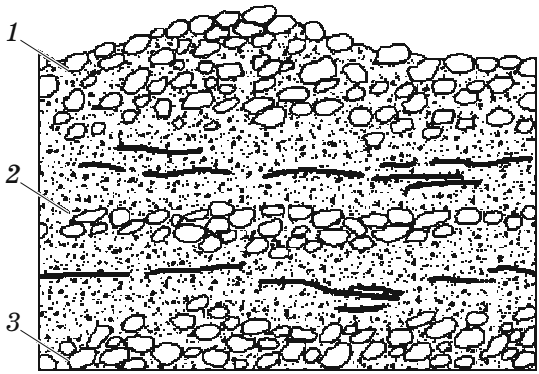


Рис. 3.7. Залегание гравия, валунов:
1 — верховое; *2* — линзовое; *3* — низовое (недровое)

В зависимости от условий залегания (рис. 3.7, 3.8) разработка рыхлых горных пород может вестись открытым способом в карьерах, реже подземным или подводным (рыхлые горные породы залегают сравнительно неглубоко от поверхности воды в реках или озерах).

При разработке месторождения вначале удаляют верхний наносный слой (вскрышу), а затем снимают верхние выветрившиеся слои горной породы. Работы в карьере обычно ведут *уступами* высотой 2...10 м. По условиям техники безопасности для рыхлых пород принимают меньшую высоту, чем для скальных.

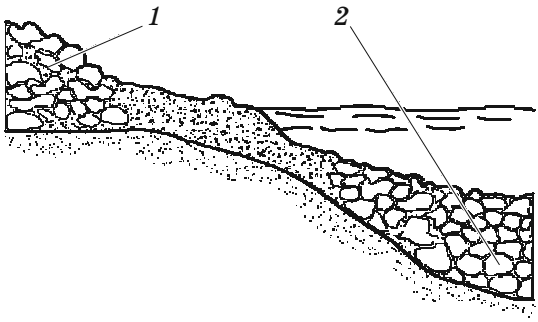


Рис. 3.8. Залегание речного валунно-гравийного камня:
1 — береговое; ***2*** — донное

Горные породы, разбитые небольшими трещинами, разрабатываются механическим способом (экскаваторами).

Массивные горные породы (как правило, изверженные) разрабатываются с применением взрывчатых веществ. Взорванную горную породу грузят экскаватором в транспортные средства и направляют на переработку на дробильно-сортировочные заводы, а также на передвижные камнедробильные сортировочные установки, где производят дробление и сортировку по фракциям с отделением мелких песчаных и пылевато-глинистых частиц.

Рыхлые горные породы (валуны, гравий, песок) добывают открытым способом, как правило, одно- и многоковшовыми экскаваторами. В большинстве случаев запасы рыхлых горных пород в пределах одного месторождения невелики, поэтому их переработка ведется в основном в передвижных установках.

Разработку камня для последующего получения облицовочных плит или стеновых блоков недопустимо производить взрывным способом, так как в этом случае камень делается трещиноватым и непригодным для обработки. Средние и мягкие породы (мрамор, известняк, вулканический туф) добывают в карьерах с помощью камнерезных машин, снабженных твердосплавными (или с алмазными насадками) дисковыми или цепными пилами (рис. 3.9). При этом из массива вырезают блоки в форме прямоугольного параллелепипеда шириной и высотой 0,2...2 м, длиной до 2,8 м. В случае, если необходимо добыть блок камня большего размера (2...10 м), используют установки с канатными пилами.

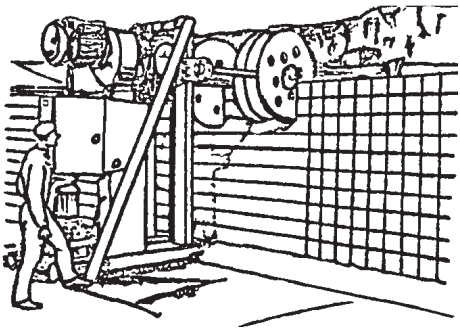


Рис. 3.9. Вырезка стеновых камней машинами с дисковыми пилами

Твердые породы (гранит, сиенит и др.) обычно разрабатывают, отделяя сначала крупный монолит. Затем его делят на блоки, из которых на камнеобрабатывающем заводе получают требуемые изделия. Отделение монолита может осуществляться несколькими способами: буроклиновым, строчечным бурением и канатными пилами с алмазными насадками. Чаще других применяется буроклиновой способ. Отделяемый объем камня обуривается по контуру перфораторами, в полученные отверстия (шпуры) вводятся гидравлические или механические клинья или расширяющиеся составы на основе минеральных вяжущих веществ — так называемый тихий взрыв. С их помощью монолит породы раскалывают по требуемой плоскости.

В настоящее время природные каменные материалы широко применяются в дорожном строительстве (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Применение природных каменных материалов в дорожном строительстве

Назначение	Требования	Рекомендуемые горные породы
Мощение автомобильных дорог	Износостойкость, прочность, морозостойкость	Базальт, диабаз, гранит, сиенит, диорит, габбро
Слои дорожной одежды	Износостойкость, прочность, морозостойкость	Гравий, песок
Щебень для тяжелого бетона	Износостойкость, прочность, морозостойкость	Гранит, сиенит, диорит, базальт, плотный известняк, доломит, кварцит
Плиты для тротуаров	Износостойкость, прочность, морозостойкость	Гнейсы
Мелкий заполнитель для бетонов и растворов	Плотность 2000…2800 кг/м^3	Песок кварцевый, полевошпатовый
Щебень для легкого бетона	Плотность до 1200 кг/м^3	Известняк пористый, туф, трахит
Фундаменты	Плотность > 2000 кг/м^3, морозостойкость	Все виды горных пород (бутовый камень, камни пиленые и колотые)

3.6. Требования к щебню, гравию и песку

Рыхлые горные породы (щебень, гравий, песок) нашли повсеместное применение в качестве заполнителей дорожных асфальто- и цементобетонов. Предъявляемые к ним требования изложены ниже.

3.6.1. Требования к щебню

В зависимости от целевого назначения (см. табл. 3.1) к гранулометрическому составу щебня предъявляются требования, изложенные в нормативно-технических документах (ГОСТы, СТБ, ТУ). Эти требования необходимы для строгого соблюдения составов смесей, из которых в сочетании с вяжущими веществами готовят дорожные и общестроительные бетоны.

Щебень и гравий выпускают в виде следующих *основных фракций*:

- от 5 (3) до 10 мм;
- свыше 10 до 20 мм;
- свыше 20 до 40 мм;
- свыше 40 до 80 (70) мм;
- смеси фракций от 5 (3) до 20 мм.

В щебне нормируют ***содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой форм***, т.е. зерен, толщина или ширина которых меньше длины в 3 раза и более. В зависимости от содержания зерен пластинчатой и угловатой формы (% по массе) щебень подразделяют на три группы:

- кубовидный — до 15;
- улучшенный — от 15 до 25;
- обычный — от 25 до 35.

Кубовидный щебень — щебень узких фракций с содержанием зерен кубовидной формы не менее 50 % по массе. Зерна кубовидной формы — зерна щебня с околотой поверхностью в форме призмы или многогранника, толщина и ширина которых меньше длины не более чем в 2 раза.

Смесь зерен щебня кубовидной формы дает наиболее плотную упаковку. Наличие в щебне зерен пластинчатой и игловатой форм приводит к увеличению межзерновой пустотности в смеси. Кубовидные зерна также обладают большей прочностью, чем зерна пластинчатой и игловатой форм.

Прочность щебня характеризуют пределом прочности исходной горной породы при сжатии, дробимостью щебня при сжатии (раздавливании) в цилиндре и износом в полочном барабане. Эти показатели имитируют сопротивление каменного материала при воздействии проходящих по дороге транспортных средств и механические воздействия в процессе строительства дорожных конструкций (укладка и уплотнение катками).

По показателю раздавливания в цилиндре устанавливают *марку щебня по прочности*, которая соответствует пределу прочности при сжатии исходной горной породы (табл. 3.2). Определив дробимость щебня при сжатии в цилиндре, устанавливают марку щебня по прочности. Так как дробимость осадочных метаморфических пород изменяется при насыщении их водой, испытания щебня допускаются в сухом и водонасыщенном состоянии.

Таблица 3.2

Марка щебня по прочности

Марка щебня по прочности	Потери в массе, %, при определении дробимости щебня			
	из изверженных (магматических) пород		из осадочных и метаморфических пород	
	интрузивных (глубинных)	эффузивных (излившихся)	в сухом состоянии	в водонасыщенном состоянии
1400	До 12	До 9	—	—
1200	Свыше 12 до 16	Свыше 9 до 11	До 11	До 11
1000	» 16 » 20	» 11 » 13	Свыше 11 до 13	Свыше 11 до 13
800	» 20 » 25	» 13 » 15	» 13 » 15	» 13 » 15
600	» 25 » 34	» 15 » 20	» 15 » 19	» 15 » 20
400	—	—	» 19 » 24	» 20 » 28
300	—	—	» 24 » 28	» 28 » 38
200	—	—	» 28 » 35	» 38 » 54

Прочность щебня зависит от плотности и структуры горной породы. Результаты испытаний на сдавливание в цилиндре зависят также от формы зерен щебня, шероховатости поверхности и зернового состава, что определяет количество контактов между зернами, через которые передается нагрузка.

Марку щебня по износу определяют испытанием подготовленных проб в полочном барабане. По полученным данным

оценивают качество щебня. По потерям массы (в %) после испытания на износ установлены четыре марки щебня по износу: И-I, И-II, И-III, И-IV.

В щебне нормируют ***содержание зерен слабых пород***, т.е. зерен с пределом прочности исходной породы при сжатии в насыщенном водой состоянии до 20 МПа. Щебень марок по прочности 1400, 1200, 1000 может содержать зерна слабых пород в количестве не более 5 % по массе, марок 800, 600, 400 — не более 10 %, марок 300 и 200 — не более 15 % по массе (ГОСТ 8267–82).

В щебне нормируют также ***содержание пылевидных и глинистых частиц***. К пылевидным и глинистым частицам относят частицы размером менее 0,05 мм, кроме того, выделяют комки глины с крупностью частиц от 1,25 мм до наибольшего размера зерен щебня данной фракции при смеси фракций. Для всех видов и марок щебня по прочности содержание глины в комках в общем количестве пылевидных и глинистых частиц не должно превышать 0,25 % по массе. В щебне из магматических и метаморфических пород содержание пылевидных и глинистых частиц по массе не должно превышать 1 %, в щебне из осадочных пород марок от 600 до 1200 — 2, а марок от 200 до 400 — 3 %.

Морозостойкость щебня характеризуют числом циклов замораживания и оттаивания. Разрешается оценивать морозостойкость щебня по числу циклов насыщения в растворе сернокислого натрия и высушивания. По морозостойкости щебень подразделяют на марки: 15, 25, 50, 100, 200, 300 и 400.

Щебень может быть получен также при дроблении валунов и гравия. В этом случае он должен содержать дробленых зерен не менее 80 % по массе. К дробленым относят зерна с околотой более чем наполовину поверхностью.

Из всех природных каменных материалов, используемых в дорожном строительстве, щебень является основным. Его используют самостоятельно для строительства щебеночных слоев или в смеси с другими материалами. При ремонте и содержании автомобильных дорог щебень является основным компонентом защитных слоев и слоев износа, обеспечивающих должную шероховатость поверхности покрытия.

3.6.2. Требования к гравию

Гравий — сыпучий зерновой материал с окатанной поверхностью, получаемый после рассева природных гравийно-песчаных смесей. Гравий разделяют по крупности аналогично щебню. Применяется также рядовой гравий с крупностью 5...40 или 5...70 мм.

Прочность гравия характеризуют его маркой, определяемой по дробимости при сжатии (раздавливании в цилиндре). Марки гравия по истираемости в полочном барабане устанавливают в соответствии с табл. 3.3 (ГОСТ 8268–82).

Таблица 3.3

Марки гравия по дробимости и истираемости

Марка гравия по дробимости при сжатии	Потеря по массе, %	Марка гравия по истираемости	Потеря по массе, %
Др. 8 (1000)	До 8	И-I	До 20
Др. 12 (800)	Свыше 8 до 12	И-II	Свыше 20 до 30
Др. 16 (600)	» 12 » 16	И-III	» 30 » 40
Др. 24 (400)	» 16 » 24	И-IV	» 40 » 50

Содержание зерен слабых пород, а также пылевидных и глинистых частиц должно быть таким, как в щебне. По морозостойкости гравий подразделяют на такие же марки, как и щебень.

Область применения гравия практически такая же, как и щебня. Однако вследствие окатанности зерен гравия прочность конструктивных слоев с его содержанием ниже, чем на щебне. Гравий применяют для строительства покрытий переходного типа, оснований, дренажных водоотводных сооружений, как крупный заполнитель в цементо- и асфальтобетоне.

3.6.3. Требования к песку

Качество песка для строительных работ оценивают по зерновому и минералогическому составу, содержанию пылевидных, глинистых, илистых частиц и органических примесей, плотности и пустотности. В отдельных случаях возникает не-

обходимость в определении дополнительных свойств: износо- и морозостойкости, фильтрационной и потенциально реакционной способности и др.

Песок подразделяют на три вида: природный, обогащенный и фракционированный.

Зерновой состав песка является основным классификационным признаком, определяющим его пригодность для строительных целей. Определяют зерновой состав путем рассева на ситах размером 5; 2,5; 1,25; 0,63; 0,315 и 0,14 мм.

Зерновой состав песка характеризуют *модулем крупности*:

$$M_к = \frac{A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,14}}{100}, \qquad (3.1)$$

где $A_{2,5}$ и др. — полные остатки на соответствующих ситах, %.

По модулю крупности и полному остатку на сите № 0,63 пески подразделяют на четыре группы (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Классификация песка по крупности

Группа песка	Модуль крупности Мк	Полный остаток на сите № 0,63, % по массе
Крупный	Свыше 2,5	Свыше 45
Средний	» 2,0 до 2,5	» 30 » 45
Мелкий	» 1,5 » 2,0	» 10 » 30
Очень мелкий	» 1,0 » 1,5	До 10

Для устройства дорожных одежд и в качестве заполнителей для цементобетонов используют крупный, средний и мелкий песок. Если пески не удовлетворяют по зерновому составу указанным требованиям, то применяют обогащенные или фракционированные пески. В качестве укрупняющей добавки к мелким пескам используют крупную фракцию дробленых песков из отсевов или природного песка.

Вторым показателем качества песка является ***содержание*** в нем ***пылевидных, глинистых и илистых частиц***, определяемое отмучиванием. Количество этих частиц в песке не должно превышать значений, приведенных в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Содержание загрязняющих примесей в песке, % по массе, не более

Песок	Пылевидные, глинистые и илистые частицы	В том числе глина в комках
Природный	3,0	0,50
Обогащенный	2,0	0,25
Фракционированный:		
крупная фракция	0,5	0,10
мелкая	1,5	0,20
Дробленый:		
обогащенный	4,0	0,35
фракционированный:	2,5	0,25
крупная фракция	1,0	0,10
мелкая	2,0	0,20
Дробленый из отсевов	5,0	0,30
То же обогащенный	3,0	0,35

В песках, предназначенных для цементобетонов и строительных растворов, ограничивается содержание органических примесей, так как гумусовые кислоты препятствуют нормальному твердению цементного камня, особенно в первые дни.

При определении ***насыпной плотности*** песка учитывается влажность. Так, с увеличением влажности до 4…7 % объем свободно насыпанного песка увеличивается, а насыпная плотность уменьшается на 10…40 %. При влажности около 20 % объем песка такой же, как рыхло насыпанного, а при дальнейшем увлажнении объем даже уменьшается. Это необходимо учитывать при транспортировании и приемке песка, при дозировании для бетонной смеси и в других случаях.

Зависимость свойств природного камня от состава и оптимальной структуры отражает объективно существующую закономерность, которую можно выразить следующим образом (по И.А. Рыбьеву): «При определенном наборе структурных параметров формируется оптимальная структура природного камня, имеющая комплекс экстремумов механических и некоторых физических свойств, непосредственно связанных со структурой и отражающих ее характер. Действует и обратная

связь: комплекс экстремумов свойств горной породы или минерала отражает наличие оптимальной структуры с характерными для нее относительной однородностью, минимальной пористостью, минимумом других микро- и макроструктурных дефектов, с наиболее устойчивым равновесным состоянием внутренних связей, с минимумом внутренней свободной энергии, с мелкозернистой плотной кристалличностью или непрерывной пространственной сеткой (прослойкой) цементирующего вещества, с оптимальным содержанием стеклофазы и наличием других структурных параметров в соответствующем их наборе»*. Эти закономерности проявляются в отношении как твердых, так и упруговязкопластичных природных образований, к которым относятся глины, суглинки, лёссы, мел, гипсы, асфальтовые породы и др. Они служат основой закона створа Рыбьева.

3.7. Защита природных каменных материалов от коррозионного разрушения

Каменные материалы в условиях службы в конструкциях могут подвергаться процессам разрушения, аналогичным выветриванию горных пород в естественных условиях.

Основными причинами разрушения каменных материалов в дорожных и мостовых конструкциях, облицовке зданий и сооружений являются:

- действие атмосферных осадков, ветра, пыли;
- резкие перепады температур (в том числе количество переходов через 0 °С), попеременное замерзание и оттаивание воды в порах и трещинах;
- попеременное увлажнение и высыхание;
- воздействие вредных выбросов в атмосферу от автомобилей и промышленных предприятий.

Оксиды SO_2, SO_3, NO_2, CO_2 и др. образуют с атмосферной влагой и грунтовыми водами кислоты, вызывающие коррозию

* *Рыбьев И.А.* Основы строительного материаловедения в лекционном изложении / И.А. Рыбьев. М.: Астрель, 2006.

(в первую очередь карбонатных пород). Каменные материалы разрушаются также от воздействия органических кислот.

Скорость разрушения каменных материалов зависит от состава, структуры и текстуры горной породы, содержания размокающих и растворимых веществ, размера и количества открытых пор, наличия микротрещин, которые могли образоваться в процессе добычи и обработки материала. Все указанные выше факторы сокращают срок службы каменных сооружений и резко ухудшают их декоративные качества.

Поверхности мраморов и известняков интенсивно разрушаются сернистыми и углекислыми газами, находящимися в воздухе, малорастворимый кальцит во влажном воздухе под действием углекислого газа переходит в легкорастворимый бикарбонат кальция по реакции

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O = Ca(HCO_3)_2.$$

Стойкость материала к выветриванию тем выше, чем больше его относительная плотность (меньше пористость) и меньше растворимость. Все мероприятия по защите каменных материалов от выветривания направлены на повышение их поверхностной плотности и предохранение от воздействия влаги.

Защитить каменные материалы от воздействия воды можно несколькими способами: конструктивным, механическим и химическим.

Конструктивный предусматривает изоляцию поверхности каменных материалов от источников агрессии путем устройства рациональных стоков жидкостей.

Механический заключается в обработке поверхности (шлифовке, полировке) для снижения площади поверхности и предотвращения скапливания и удерживания на камне агрессивных веществ.

Поверхность каменных материалов можно уплотнить путем их пропитки гидрофобными составами, например кремнийорганическими гидрофобизированными жидкостями (ГКЖ). Гидрофобизация препятствует адсорбции и удержанию жидкостей поверхностью, а также капиллярному впитыванию.

При *химическом* способе защиты каменный материал пропитывают водным раствором веществ, вступающих в химическое взаимодействие с минералом камня. При этом растворимое вещество камня переходит в нерастворимое состояние. Такой метод защиты называется ***флюатированием***. Для флюатирования используют соли кремнефтористо-водородной кислоты (например, флюат магния $MgSiF_6$). При флюатировании известняковых пород произойдет реакция

$$2CaCO_3 + MgSiF_6 = 2CaF_2 + MgF_2 + SiO_2 + 2CO_2.$$

В результате этой реакции в порах камня и на его поверхности выделяются нерастворимые вещества CaF_2, MgF_2, SiO_2, повышающие не только прочность и морозостойкость камня, но и его химическую стойкость.

Некарбонатные породы перед пропиткой флюатами предварительно обрабатывают водными растворами кальциевых солей, например хлористым кальцием ($CaCl_2$) и раствором соды (Na_2CO_3), в результате чего образуется карбонат кальция:

$$CaCl_2 + Na_2CO_3 = CaCO_3 + 2NaCl.$$

Далее производят флюатирование.

Перед флюатированием поверхность пористого камня целесообразно насытить известковым молоком, тогда пройдет реакция между флюатом и гидроксидом кальция:

$$MgSiF_6 + 2Ca(OH)_2 = 2CaF_2 + MgF_2 + SiO_2 + 2H_2O.$$

Полиминеральные горные породы более склонны к коррозии, чем мономинеральные, состоящие из одних плотных и прочных минералов. Полиминеральность вызывает разное отношение частиц минералов к агрессивным агентам: часть минералов разрушается, нарушая связи между остальными частицами.

Долговечность природных каменных материалов значительно увеличивается при нанесении на их поверхность пленкообразующих полимерных материалов или при пропитке поверхностного слоя мономером с последующей его *полимеризацией*.

3.8. Приемка каменных материалов. Техника безопасности и охрана окружающей среды

Приемку заготовленного каменного материала производят на месте добычи (карьер), складах и месте производства. Пригодность каменных материалов определяют непосредственно в карьере. Предприятие (карьер-изготовитель) должно гарантировать соответствие качества продукции действующим стандартам.

Поставку и приемку каменных материалов производят *партиями*. Так, партией щебня, гравия или песка считается количество этого материала, одновременно отгружаемое одному потребителю в одном железнодорожном составе или в одном судне. При отгрузке автомобилями партией считают количество материала, отгружаемое одному потребителю в течение суток.

Определение количества поставляемого каменного материала производят по объему или массе. Обмер щебня, гравия или песка производят в вагонах, судах или автомобилях. Пересчет количества щебня, гравия или песка из единиц массы в объемные производят по значениям их насыпной плотности, определяемой в состоянии естественной влажности.

При определении объема щебня или гравия в месте доставки после транспортирования объем материала должен быть умножен на коэффициент уплотнения, не превышающий 1,1.

Предприятие (карьер-изготовитель) сопровождает каждую партию поставляемого материала паспортом, в котором указывает его основные свойства.

На предприятиях по переработке скальных горных пород в строительные материалы и изделия основным направлением охраны труда является борьба с запыленностью и шумом. Пыль камнедробильных заводов содержит очень вредный компонент — кремнезем (SiO_2), который вызывает *силикоз*. Для

защиты от пыли используют принудительную вентиляцию и респираторы.

Снижение шума на камнеперерабатывающем предприятии достигают путем ограждения мест образования шума, введения дистанционного управления, автоматизацией всего технологического процесса. В качестве личных средств защиты против шумового воздействия эффективны специальные наушники.

Техника безопасности при приемке и транспортировании заключается в соблюдении ряда правил, регламентирующих эти виды работ.

В современных условиях, когда человек активно вмешивается в природные процессы, охрана окружающей среды является одной из самых острых и актуальных проблем.

Добыча каменных материалов связана с разработкой недр открытым способом. Как правило, вскрышной слой, покрывающий полезное ископаемое, в верхней части содержит *почву* — особое природное образование, возникшее в результате преобразования поверхностных слоев земной коры под совместным воздействием воды, воздуха и живых организмов. Без почвенного покрова земля не способна к плодородию. Поэтому при разработке карьера почву необходимо предварительно снимать и складывать в специально отведенных местах. Вскрышные породы, расположенные ниже почвенного слоя, используют в соответствии с учетом их технических свойств для строительства автомобильных дорог.

Почву из мест складирования используют для рекультивации карьеров, отвалов пустых пород, территории временных предприятий и др. Если месторождение каменных материалов покрыто кустарником или мелколесьем, то их можно использовать как посадочный материал для противоэрозионных лесонасаждений при закреплении оврагов, полезащитных и придорожных лесополос.

Выработанное пространство карьера можно использовать для нужд сельского хозяйства, декоративного озеленения, как площадки для строительства зданий. Если позволяют грунты, то выработки используют для создания водоемов.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Что такое природные каменные материалы? Какие их разновидности применяют в дорожном строительстве?

2. Дайте определение понятий «горная порода» и «минерал».

3. Что такое структура (строение) и текстура (сложение) горных пород?

4. Как классифицируются горные породы?

5. Каковы основные свойства горных пород, применяемых в качестве сырья для дорожно-строительных материалов?

6. Каковы основные виды дорожно-строительных материалов и их свойства?

7. Какие применяются способы защиты природных каменных материалов от разрушения?

4 НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА

4.1. Характеристика и классификация неорганических вяжущих веществ

Неорганическими вяжущими веществами называют тонкоизмельченные порошкообразные минеральные материалы, которые при затворении водой (водными растворами некоторых солей) образуют пластичное тесто, способное со временем затвердевать под влиянием внутренних физико-химических процессов и переходить в камневидное состояние.

Неорганические вяжущие вещества являются продуктами обжига определенного минерального сырья.

В зависимости от условий твердения вяжущего и области применения различают воздушные, гидравлические вяжущие вещества, а также вещества автоклавного твердения.

Для получения вяжущих материалов с заданными свойствами сырье должно иметь определенный химический состав. Для этого при изготовлении вяжущих используют данные, которые характеризуют определенное соотношение между различными оксидами, входящими в данный состав. Такие соотношения называют ***модулями***. Различают несколько таких модулей:

- основный (или гидравлический):

$$\text{ОМ} = \frac{\%\text{CaO}}{\%\left(\text{SiO}_2 + Al_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3\right)}; \qquad (4.1)$$

чем выше значение модуля, тем вяжущее ближе к условиям только воздушного твердения;

- силикатный (кремнеземный):

$$\text{СМ} = \frac{\%\text{SiO}_2}{\%\left(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3\right)}; \quad (4.2)$$

- глиноземный (алюминатный):

$$\text{ГМ} = \frac{\%\text{Al}_2\text{O}_3}{\%\text{Fe}_2\text{O}_3}. \quad (4.3)$$

Значения модулей показывают, какие относительные количества различных оксидов должны быть получены при обжиге сырьевых материалов, чтобы образовалось требуемое вяжущее вещество. Так, например, для портландцемента необходимо, чтобы указанные модули были в пределах ОМ = 1,9...2,4; СМ = 1,7...4,0; ГМ = 1,0...3,0.

Значения основного модуля для некоторых гидравлических вяжущих материалов приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Осно́вный модуль гидравлических вяжущих материалов

Вяжущее	*m*
Воздушная известь	> 9
Слабогидравлическая известь	4,5...9,0
Сильногидравлическая известь	1,7...4,5
Романцемент	<1,7

4.2. Воздушные вяжущие вещества

Эти вяжущие вещества, будучи смешаны с водой, могут твердеть и длительно сохранять прочность только в воздушно-сухой атмосфере.

К воздушным вяжущим относятся: воздушная известь, гипсовые и магнезиальные вяжущие, а также жидкое стекло, которое, как исключение из общего числа вяжущих, не относится к порошкообразным материалам.

4.2.1. Воздушная известь

Воздушная известь — продукт умеренного обжига (не до спекания) кальциево-магниевых горных пород — мела, известняков, доломитов, содержащих не более 6 % глины.

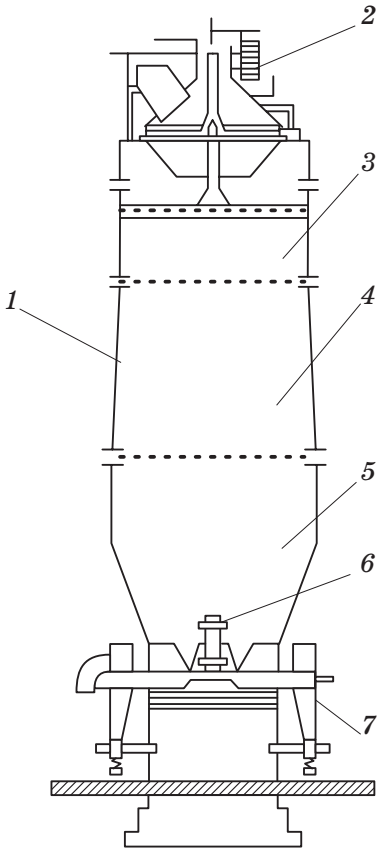
Воздушная известь применяется для приготовления строительных растворов и бетонов. Она была известна как вяжущее вещество еще за несколько тысяч лет до нашей эры.

Технология получения воздушной извести состоит из следующих операций:

1) добыча известняка в карьерах;

2) подготовка известняка к обжигу (дробление и сортировка);

3) обжиг известняка в шахтных печах.



Известняк и топливо загружаются в печь (рис. 4.1) сверху через загрузочное устройство. Воздух для горения подается под давлением с помощью вентилятора в нижнюю часть печи (зону охлаждения). В этой зоне обожженная известь охлаждается воздухом, который, нагреваясь, поступает в среднюю часть печи — зону обжига, где происходит горение топлива. Температура обжига составляет 1000...1200 °С. При этом идет термическая диссоциация $CaCO_3$ по уравнению

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 - q.$$

Рис. 4.1. Схема пересыпной шахтной печи:
1 — шахта; *2* — загрузочное устройство; *3* — зона подогрева; *4* — зона обжига; *5* — зона охлаждения; *6* — гребень для подачи воздуха; *7* — выгрузочное устройство

Горячие дымовые газы с помощью дымососов подаются в зону подогрева, где отдают тепло известняку и топливу, испаряя из них влагу и нагревая их. Образующийся углекислый газ CO_2 составляет примерно 45 % от массы известняка.

Образующиеся куски извести имеют пористую структуру. Такая известь называется ***комовой негашеной*** или ***известью-кипелкой*** и состоит, в основном, из оксида кальция (CaO).

Известь с высоким содержанием CaO, получаемая при обжиге чистых известняков, называется *жирной*, а известь, получаемая из известняков, в которых содержатся глинистые и другие примеси, — *тощей*.

Гашение воздушной извести. При добавлении воды к комовой извести происходит гидратация оксида кальция по реакции

$$CaO + H_2O = Ca(OH)_2 + q.$$

Этот процесс гашения сопровождается выделением большого количества тепла (65,1 кДж). Различают гашение извести в пушонку и тесто.

Гашение извести в пушонку. Если известь гасить сравнительно небольшим количеством воды (50...70 % от массы извести), то образуется сухой, рыхлый порошок $Ca(OH)_2$, называемый ***гидратной известью*** или ***пушонкой***. Объем этого порошка почти в три раза превышает исходный объем комовой извести.

На скорость гашения извести влияет температура: с ее повышением процесс гашения ускоряется. Особенно быстро этот процесс протекает под воздействием пара при повышенном давлении.

Гашение извести в промышленных масштабах производят в специальных машинах — гидраторах (рис. 4.2).

Гашение извести в тесто. На строительстве комовую известь чаще всего гасят в тесто — с добавлением воды более 70 % от массы извести. На небольших стройках комовую известь гасят в ямах, в которых известковое тесто выдерживают не менее 14 суток. На крупных строительствах комовую известь гасят в высокопроизводительных гасильных машинах.

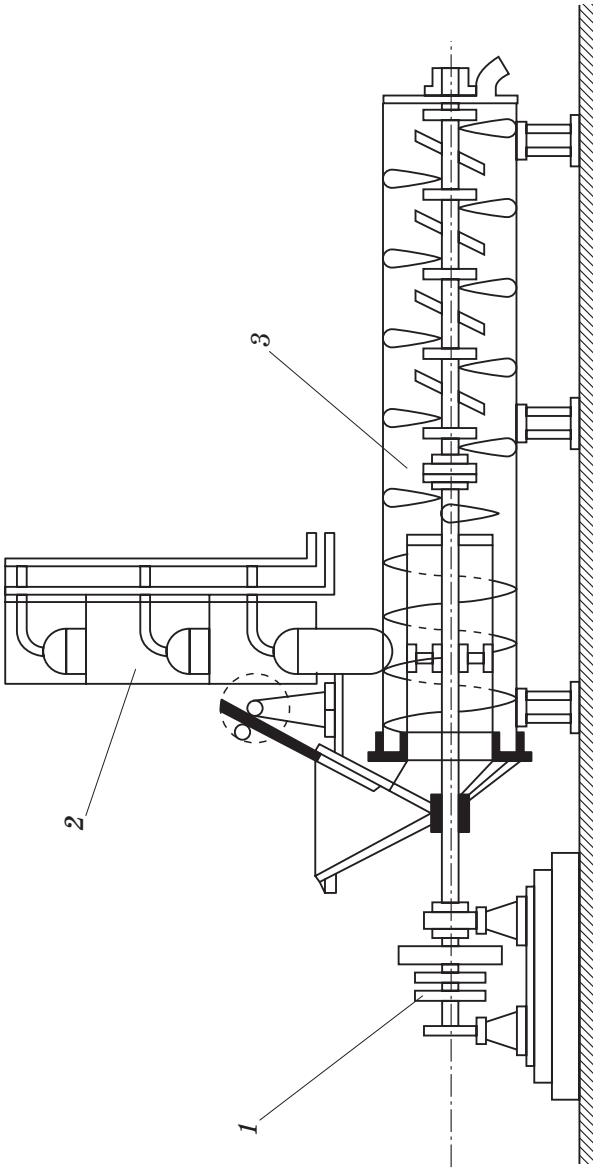


Рис. 4.2. Гидратор для гашения извести:
1 — привод; *2* — емкость для воды; *3* — лопастная мешалка

Запрещается применять известковое тесто, в котором осталась непогасившаяся полностью известь (пережог), поскольку гашение будет происходить уже в кладке или штукатурке, что вызовет растрескивание затвердевшего известкового раствора.

Твердение известковых растворов. Известь используется в строительстве только в виде растворов (смеси с песком или с другими заполнителями). Это объясняется тем, что «чистое» известковое тесто при высыхании дает большую усадку и растрескивается.

Физический смысл высыхания и твердения раствора заключается в следующем. В известковом тесте содержится значительное количество воды, поэтому кристаллы $Ca(OH)_2$ разделены водными пленками. Высыхание известковых растворов вызывает медленное сближение кристаллов $Ca(OH)_2$ и их постепенное срастание в кристаллический сросток.

Процесс твердения раствора в объеме протекает длительное время. На поверхности же раствора и на небольшой глубине под действием углекислого газа воздуха протекает процесс ***карбонизации*** по реакции

$$Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O.$$

Образующиеся при этом кристаллы $CaCO_3$ срастаются с кристаллами $Ca(OH)_2$, что также упрочняет известковый раствор. Следовательно, для ускорения процесса карбонизации необходимо, чтобы растворы интенсивнее взаимодействовали с атмосферным воздухом.

Поскольку при карбонизации выделяется вода, каменную кладку и штукатурку на известковых растворах желательно подвергать принудительной сушке.

Для получения водостойкого раствора к извести добавляют активные гидравлические добавки: золы теплоэлектростанций, молотые шлак, пемзу и др. Эти добавки содержат аморфные глинозем Al_2O_3 и кремнезем SiO_2, которые в присутствии воды образуют с известью нерастворимые химические соединения типа гидросиликатов кальция или гидроалюминатов кальция:

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \rightarrow \underset{\text{гидросиликат кальция}}{nCaO \cdot SiO_2 \cdot mH_2O}.$$

Известь с активными минеральными добавками применяют в штукатурных растворах для подземной части сооружений и в растворах, твердеющих во влажных условиях.

Обычно строительную воздушную известь применяют для приготовления кладочных и штукатурных растворов, бетонов низких марок, которые работают в сухих условиях, а также для получения силикатного кирпича, ячеистобетонных изделий автоклавного твердения, известковых красок, смешанных вяжущих и других материалов.

Виды и свойства воздушной извести. Воздушная известь в зависимости от содержания в ней оксидов кальция и магния делится:

- на кальциевую (MgO не более 5 %);
- магнезиальную (MgO от 5 до 20 %);
- доломитовую (MgO от 20 до 40 %).

На строительство известь поставляют в следующих видах:

- негашеная комовая (кипелка);
- негашеная порошкообразная (молотая кипелка);
- гашеная (гидратная) порошкообразная (пушонка).

Негашеная комовая известь — это полуфабрикат для получения молотой извести, гидратной (пушонки), известкового песка и молока.

Комовую известь перевозят навалом в закрытых вагонах и автомашинах. Ее хранят в сухих складах с деревянным полом, приподнятым над землей на 30...35 см. Попадание воды должно быть исключено: реакция с водой вызывает сильный саморазогрев (до 300 °С), что при контакте с легко воспламеняющимися материалами (опилки, стружки и др.) может вызвать пожар.

Негашеную *молотую известь* получают помолом комовой извести в шаровых мельницах. Иногда при помоле в известь вводят 10...20 % гидравлических добавок (зола, шлак).

Гашеная (гидратная) известь заводского изготовления поставляется в цементовозах, контейнерах, бумажных мешках и навалом (в закрытых вагонах). Хранят известь в силосах или бункерах. Влажность гидратной извести должна быть не более 5 %, насыпная плотность 400...450 кг/м^3.

Известковое тесто представляет собой пасту плотностью 1300...1400 кг/м^3. Оно образуется при гашении комовой извести избыточным количеством воды; из 1 кг извести получается около 2...2,5 л известкового теста. После гашения тесто сливают через сетку в известехранилище, где выдерживают не менее двух недель. Содержание воды в известковом тесте не нормируется. Однако практика показывает, что в хорошо выдержанном тесте соотношение воды и извести равно 1.

Воздушная известь всех видов — ***сильная щелочь***. Поэтому при работе должна быть предусмотрена защита открытых участков кожи, глаз и дыхательных органов от контакта с ней.

Важнейшими показателями качества воздушной извести являются:

- ***активность*** — содержание активных, т.е. способных к гашению, оксидов CaO + MgO (в %);
- ***содержание непогасившихся зерен*** (в %): при недожоге — неразложившегося $CaCO_3$, при пережоге — остеклованного CaO;
- ***время гашения*** (в мин). В зависимости от него различают следующие виды извести: быстрогасящуюся — не более 8 мин; среднегасящуюся — не более 25 мин, медленногасящуюся — не менее 25 мин.

В зависимости от перечисленных нормированных свойств негашеная и гидратная известь делится на сорта (по соответствующему ГОСТу).

Строительные растворы на воздушной извести вследствие высокой пористости характеризуются низкой прочностью. Например, на 28-е сутки твердения образцы (известковое тесто + песок) имеют предел прочности при сжатии 0,5...1 МПа. При использовании молотой негашеной извести образцы имеют более высокую прочность — до 5 МПа.

Применение воздушной извести. Строительную воздушную известь применяют для приготовления кладочных и штукатурных растворов, бетонов низких марок, работающих в сухих условиях, силикатного кирпича, ячеистобетонных изделий автоклавного твердения, известковых красок, смешанных гидравлических вяжущих и других материалов.

4.2.2. Гипсовые вяжущие вещества

Гипс, как и воздушная известь, известен давно. Так, например, пирамида Хеопса в Египте (одно из семи чудес света) была построена более 4100 лет назад. Ее каменные блоки скреплялись гипсовым раствором.

Гипсовые вяжущие вещества подразделяются на строительный гипс и ангидритовые вяжущие вещества.

Строительный гипс иногда называют ***алебастром*** (греч. alebastros — белый). Это минеральное вяжущее воздушного твердения образуется путем тепловой (140...190 °С) обработки и помола природного гипсового камня ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). При этом происходит частичная дегидратация двуводного гипса с переходом его в полуводный гипс:

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O + 1{,}5H_2O.$$

При осуществлении этого процесса в котлах выделяется водяной пар (поэтому говорят, что гипс «варят»).

Процесс твердения гипса характеризуется значительным выделением тепла, что вызывает повышение температуры до 50 °С и увеличение объема затвердевающей массы до 1 %.

Гипс — быстросхватывающееся вяжущее, что затрудняет ведение строительных работ. Для замедления схватывания чаще всего используют кератиновый и известково-клеевой замедлители (0,1...0,5 %).

При производстве работ в зимнее время, наоборот, для ускорения схватывания используют двуводный гипс и поваренную соль NaCl (0,5...2 %).

Основными свойствами гипсовых вяжущих, определяющими их качество, являются: *водопотребность, сроки схватывания, тонкость помола* и *прочность при сжатии и изгибе*.

Гипсовые вяжущие в воде снижают прочность вследствие растворения своей кристаллической структуры. Поэтому для повышения водостойкости гипсовых вяжущих в их состав вводят портландцемент, известь-кипелку, тонкомолотый доменный гранулированный шлак; покрывают изделия из гипса водоотталкивающими пленками и водозащитными слоями; пропитывают синтетическими смолами.

На основе гипсовых вяжущих изготавливают смешанные вяжущие вещества (гипсоцементно-пуццолановые, гипсоизвестковые, гипсошлаковые и др.).

В зависимости от способа обработки сырья гипсовое вяжущее может быть двух видов: α- и β-полугидраты. Если тепловая обработка сырья идет при атмосферном давлении и вода выделяется в виде пара, то образуется β-модификация $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$. Этот гипс характеризуется мелкокристаллической структурой и повышенной водопотребностью.

Для получения β-модификации полуводного гипса природный гипс нагревают в открытых аппаратах, сообщающихся с атмосферой, с удалением воды в виде перегретого пара (рис. 4.3).

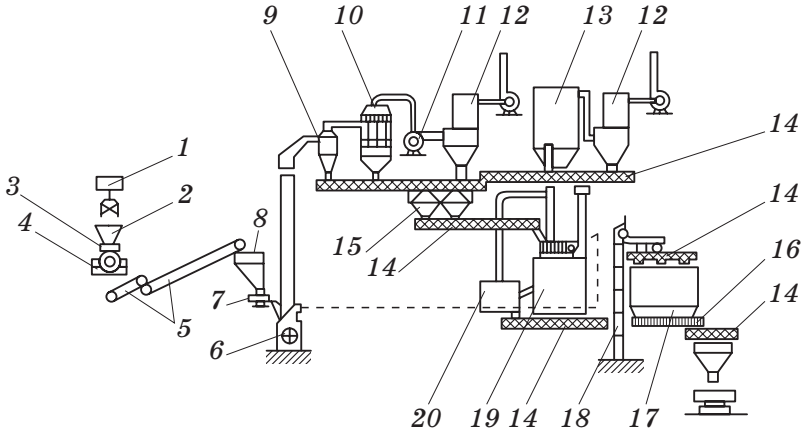


Рис. 4.3. Схема производства строительного гипса с применением варочных котлов:
1 — мостовой грейдерный кран; *2* — бункер гипсового камня; *3* — лотковый питатель; *4* — щековая дробилка; *5* — ленточные конвейеры; *6* — шахтная мельница; *7* — тарельчатый питатель; *8* — бункер гипсового щебня; *9* — сдвоенный циклон; *10* — батарея циклонов; *11* — вентилятор; *12* — рукавные фильтры; *13* — пылеосадительная камера; *14* — шнеки; *15* — бункер сырого молотого гипса; *16* — скребковый конвейер; *17* — бункер готового гипса; *18* — элеватор; *19* — гипсоварочный котел; *20* — камера томления

При тепловой обработке паром под давлением 0,2...0,3 МПа в герметически закрывающихся аппаратах образуется α-модификация $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$, которая состоит из более крупных кристаллов. Вода из гипсового камня выделяется в виде жидкости. Этот гипсовый материал является более прочным и быстротвердеющим вяжущим из-за низкой водопотребности.

***Ангидритовое вяжущее* (*ангидритовый цемент*)** получается в результате обжига природного гипса при 600...700 °С до полной гидратации, т.е. до образования ангидрита, с одновременным помолом совместно с некоторыми добавками — активаторами (рис. 4.4).

Ангидритовое вяжущее медленно схватывается и твердеет, поэтому к нему необходимо добавлять активаторы твердения. Например, природный безводный ангидрит даже в тонкоразмолотом состоянии не обнаруживает вяжущих свойств. В качестве активаторов используют щелочные добавки: известь (3...5 %) или основные шлаки (10...15 %), а также растворимые сульфаты — Na_2SO_4, $Al_2(SO_4)_3$, $FeSO_4$ (0,5...1 %).

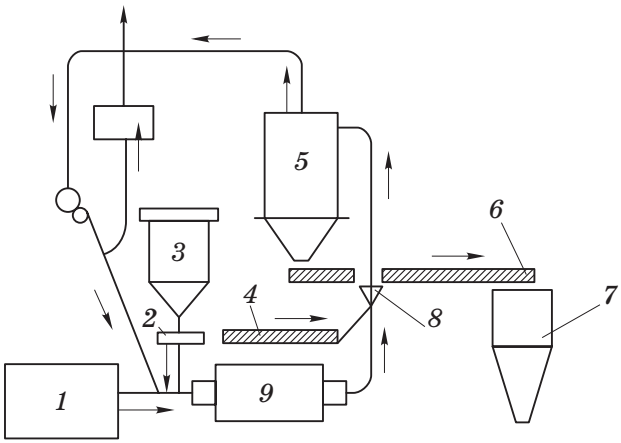


Рис. 4.4. Схема производства строительного гипса путем одновременного обжига и помола в шаровой мельнице:
1 — смесительная камера; *2* — тарельчатый питатель; *3* — бункер; *4*, *6* — шнеки; *5* — циклон; *7* — склад готовой продукции; *8* — сепаратор; *9* — шаровая мельница

В присутствии указанных добавок ангидрит, взаимодействуя с водой, способен схватываться и твердеть.

Предел прочности при сжатии у ангидритового вяжущего («ангидритового цемента») составляет 10...20 МПа, начало схватывания наступает не ранее 30 мин, конец — не позже суток.

Высокообжиговый гипс (*эстрих-гипс*) получают при обжиге гипсового сырья при температуре 850...900 °С. При этом идет его частичная диссоциация с образованием CaO, который служит активатором твердения ангидрита. Начало схватывания наступает не ранее чем через 2 ч, конец схватывания не нормируется.

В связи с пониженной водопотребностью (у эстрих-гипса она составляет 30...35 %, а у обычного гипса — 50...60 %) эстрих-гипс после затвердевания обладает большей плотностью и прочностью. Затвердевший высокообжиговый гипс имеет высокую прочность (15...30 МПа), малую теплопроводность, хорошую звукопоглощаемость.

Отделочный ангидритовый цемент получают из чистых разновидностей природного гипса путем одно- или двукратного обжига при температуре 600...700 °С с обработкой до обжига или после него алюмокалиевыми квасцами, бурой или другими солями. Отделочный цемент имеет белый цвет и применяется для отделочных работ, в частности для получения искусственного мрамора.

Строительный гипс широко применяют для приготовления штукатурных растворов, для внутренней отделки стен и потолков в помещениях с нормальной влажностью. Свыше 90 % всего вырабатываемого гипса поступает на строительство в виде эффективных готовых изделий заводского изготовления.

Из гипсовых и ангидритовых вяжущих материалов изготавливают различные строительные детали и архитектурно-декоративные изделия: перегородочные плиты, сухую штукатурку, вентиляционные короба, карнизы, искусственный мрамор и т.д.

4.2.3. Магнезиальные вяжущие вещества

К магнезиальным вяжущим веществам относятся каустический магнезит и каустический доломит.

Каустический магнезит получают обжигом природного магнезита $MgCO_3$ в шахтных или вращающихся печах при 750...850 °С. При обжиге происходит диссоциация углекислого магния:

$$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2.$$

После обжига каустический магнезит размалывают в тонкий порошок и сразу же упаковывают в металлические бочки, поскольку при хранении на воздухе он быстро теряет свою активность.

Сроки схватывания каустического магнезита зависят от температуры обжига и находятся в следующих пределах: начало — не ранее 20 мин, конец — не позднее 6 ч. Твердение начинается интенсивно, через 1 сут. вяжущее достигает прочности 10...15 МПа, через 28 сут. воздушного твердения прочность составляет 30...50 МПа, а в жестких смесях — до 100 МПа.

Каустический доломит — продукт обжига природного доломита $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ при температуре 650...800 °С. При этой температуре происходит диссоциация только углекислого магния:

$$CaCO_3 \cdot MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2 + CaCO_3.$$

Углекислый кальций $CaCO_3$ при этом не разлагается и является инертным материалом. Поэтому получаемое вяжущее по качеству хотя и уступает каустическому магнезиту, но является более дешевым и может применяться там же, где каустический магнезит. У каустического доломита сроки схватывания больше, чем у последнего, а прочность ниже (10...30 МПа через 28 сут.).

Магнезиальные вяжущие отличаются повышенной прочностью сцепления с каменными и древесными материалами, особенно прочностью на разрыв. Наиболее широкое применение магнезиальное вяжущее получило при изготовлении *ксилолита* — бетона на магнезиальном вяжущем с наполнителем

из древесных опилок и *фибролита* (то же, но с древесными стружками).

Магнезиальному бетону с помощью пигментов можно придать высокую декоративность, что позволяет устраивать цветные полы и изготавливать декоративные архитектурно-художественные плиты (1200 × 600 мм), а также искусственный мрамор.

4.2.4. Жидкое (растворимое) стекло

Жидкое стекло представляет собой натриевый ($Na_2O \cdot nSiO_2$) или калиевый ($K_2O \cdot nSiO_2$) силикат.

Растворимый силикат натрия $Na_2O \cdot nSiO_2$ получают сплавлением в стекловаренных печах при 1300...1400 °С в течение 7...10 ч измельченной смеси кварцевого песка (SiO_2) с содой (Na_2CO_3). Растворимый силикат калия $K_2O \cdot nSiO_2$ получают сплавлением песка с поташом (K_2CO_3). При этом происходят следующие реакции:

$$Na_2CO_3 + nSiO_2 \rightarrow Na_2O \cdot nSiO_2 + CO_2,$$
$$K_2CO_3 + nSiO_2 \rightarrow K_2O \cdot nSiO_2 + CO_2.$$

Полученный сплав сливают в вагонетки и вследствие быстрого охлаждения он застывает в виде отдельных кусков, называемых *силикат-глыбой*. Затем раздробленные куски растворяют в воде в автоклаве при температуре 120...150 °С и давлении пара 0,6...0,8 МПа в течение 2...3 ч. В результате получают густую жидкость — жидкое натриевое или калиевое стекло.

Таким образом, основной частью растворимого стекла являются щелочные силикаты, свойства которых оценивают с помощью *модуля*, представляющего *отношение количества кремнезема к оксиду натрия* (*или калия*):

$$n = \frac{SiO_2}{Na_2O} = 2{,}0...3{,}5. \qquad (4.4)$$

Чем выше модуль, тем труднее растворяется стекло.

Жидкое стекло твердеет только на воздухе вследствие высыхания и выделения аморфного кремнезема под действием углекислого газа воздуха по реакции

$$Na_2O \cdot nSiO_2 + CO_2 = Na_2CO_3 + nSiO_2.$$

Для ускорения твердения и повышения водоустойчивости в жидкое стекло добавляют 10...15 % кремнефтористого натрия (Na_2SiF_6). При этом образуется водонерастворимый фторид натрия NaF и кремнегель $SiO_2 \cdot nH_2O$, что обеспечивает ускоренное твердение.

Жидкое стекло перевозят в бочках, хранят в закрытых отапливаемых помещениях.

В строительстве применяют в основном натриевое жидкое стекло плотностью 1300...1500 кг/м^3 и модулем 2,6...3,0.

Жидкое стекло применяют для закрепления грунтов (в сочетании с хлористым кальцием), приготовления защитных красок, замазок, защиты каменных материалов от выветривания, а также для изготовления кислотоупорного цемента.

Кислотоупорный кварцевый цемент — это тонкоизмельченный порошок, получаемый совместным помолом кварцевого песка (SiO_2) или другого кислотостойкого материала (например, андезита) с добавкой 4...14 % кремнефтористого натрия (Na_2SiF_6). При этом допускается смешивать измельченные раздельно материалы. Вяжущим свойством полученная порошкообразная композиция не обладает. Это качество приобретается лишь при ее затворении жидким стеклом (плотность 1360...1380 кг/м^3, модуль 2,8...3,0). Кислотоупорный цемент быстро схватывается: начало схватывания — через 20...60 мин после затворения. Твердеет такой цемент в воздушно-сухих условиях и только при положительных температурах.

Кислотоупорный цемент применяют для изготовления кислотостойких растворов, бетонов, замазок, для футеровки химических аппаратов, устройства кислотостойких полов в промышленных предприятиях.

4.3. Гидравлические вяжущие вещества

Гидравлические вяжущие вещества способны в тестообразном состоянии твердеть и длительно сохранять прочность не только на воздухе, но и в воде. В начальный период твердения требуется, чтобы изделие, в котором использовалось гидравлическое вяжущее, находилось во влажной среде.

Влага необходима для протекания химических реакций, формирующих кристаллическую структуру материала изделия. Когда влажность окружающей среды достаточна, гидравлические вяжущие повышают свою прочность длительное время (месяцы и годы). Поэтому, в отличие от воздушных, гидравлические вяжущие могут применяться в наземных, подземных, гидротехнических и других сооружениях, подверженных воздействию водной среды.

К гидравлическим вяжущим относятся: глиноземистый цемент, пуццолановые и шлаковые смешанные цементы, гидравлическая известь, романцемент, а также портландцемент и его разновидности. Гидравлическая известь и романцемент по химико-минералогическому составу и особенностям процесса твердения занимают как бы промежуточное место между воздушными и гидравлическими вяжущими веществами.

В строительстве широкое применение находят как воздушные, так и гидравлические вяжущие. Одновременно с ними применяют вяжущие вещества автоклавного твердения, которые эффективно твердеют только при высокой температуре (170...200 °С) и обязательно в среде насыщенного водяного пара при давлении 0,8...1,2 МПа. В перечень таких вяжущих входят известково-зольные, известково-кремнеземистые и известково-шлаковые цементы.

4.3.1. Гидравлические известьсодержащие вяжущие вещества

Низкая водостойкость материалов, в которых в качестве вяжущего вещества применяется известь, всегда инициировала поиск методов ликвидации этого недостатка. Еще в Древнем Риме строители нашли способ получения водостойкого вяжущего с применением извести. Было установлено, что при добавлении к извести вулканического пепла и затворении этой смеси водой после твердения ее на воздухе в течение 7–14 сут. она могла далее твердеть в воде (причем, как оказалось, именно влажные условия были обязательны для набора прочности). В истории строительного материаловедения это было первое гидравлическое вяжущее.

Добавки вулканических горных пород (вулканического пепла, туфа и др.) затем получили название ***гидравлических***, или ***пуццолановых*** (по названию места у подножия Везувия, где добывались эти породы).

Смешанные известьсодержащие вяжущие вещества получают совместным измельчением негашеной извести (10...30 %), гидравлической добавки (85...70 %) и гипса (до 5 %). В качестве гидравлической добавки применяют горные породы, содержащие активный (аморфный) кремнезем: вулканический пепел, туф, пемзу, трепел и др. Получаемые таким образом вяжущие называют ***известково-пуццолановыми***. Если в качестве гидравлической добавки используется измельченный доменный гранулированный шлак, то такие вяжущие называются ***известково-шлаковыми***.

Известьсодержащие гидравлические вяжущие вначале (до 7 суток) должны твердеть на воздухе, а затем — во влажных условиях.

В Беларуси, согласно СТБ 968–94, производят шлакопуццолановое вяжущее с использованием электросталеплавильного шлака Белорусского металлургического завода, трепела, боя керамики, стекла (в виде активных минеральных добавок), гипса и активатора твердения (NaCl или $CaCl_2$). Прочность вяжущего достигает 100 МПа, начало схватывания — не ранее 45 мин, конец — не позже 12 ч.

4.3.2. Строительная гидравлическая известь

Гидравлической известью называют гидравлическое вяжущее вещество, получаемое умеренным обжигом не до спекания (900...1100 °С) мергелистых известняков, содержащих от 6 до 20 % глинистых веществ.

Получение гидравлической извести состоит из следующих процессов:

1) добыча сырья;

2) обжиг сырья в шахтных печах;

3) помол сырья.

При обжиге мергелистых известняков после диссоциации $CaCO_3$ часть образующейся CaO соединяется с оксидами SiO_2,

Al_2O_3 и Fe_2O_3, входящими в состав глинистых веществ. При этом образуются силикаты кальция ($CaO{\cdot}SiO_2$,), ферриты кальция ($CaO{\cdot}Fe_2O_3$) и алюминаты кальция ($CaO{\cdot}Al_2O_3$), которые обусловливают способность гидравлической извести твердеть не только на воздухе, но и под водой:

$$2CaO + SiO_2 = 2CaO \cdot SiO_2;$$
$$2CaO + Fe_2O_3 = 2CaO \cdot Fe_2O_3;$$
$$CaO + Al_2O_3 = CaO \cdot Al_2O_3.$$

Поскольку в гидравлической извести содержится значительное количество свободного оксида кальция (CaO), то она, так же как и воздушная известь, гасится при действии на нее воды.

Гидравлическая известь должна выдерживать испытание на равномерность изменения объема при твердении. Предел прочности при сжатии определяется на образцах из раствора извести с песком состава 1:3 по массе после 28 сут. комбинированного хранения (7 сут. во влажном воздухе и 21 сут. в воде). Растворы на гидравлической извести в первые сутки твердения следует защищать от воздействия воды, так как они легко размываются.

Гидравлическую известь применяют для приготовления строительных растворов, а также для получения бетонов низких марок и изготовления бетонных камней.

На стройплощадки гидравлическую известь доставляют в виде готового порошка в цементовозах, бумажных многослойных мешках.

Комовую гидравлическую известь гасят в специальных аппаратах, в которых гашение совмещается с помолом, так как при гашении в творильных ямах образуется значительное количество непогасившихся частиц CaO.

4.3.3. Романцемент

Романцемент — гидравлическое вяжущее вещество, продукт тонкого помола обожженных не до спекания (900 °С) известняковых или магнезиальных мергелей, содержащих более 20 % глинистых примесей.

Прочность раствора на романцементе выше, чем на гидравлической извести. По прочности при сжатии (образцы из цементного раствора состава 1:3 в возрасте 28 сут.) романцемент делится на три марки: 25, 50 и 100. Плотность романцемента в рыхлом состоянии 800...1000 кг/м^3, начало схватывания — не ранее 15 мин, конец — не позднее 24 ч.

Романцемент применяют так же, как и гидравлическую известь (растворы для каменной кладки и наружной штукатурки, бетоны низких марок). Вследствие невысокой прочности романцемент в железобетонных конструкциях не применяют. Перевозится и хранится он так же, как и гидравлическая известь.

4.4. Портландцемент

Создание портландцемента связано с именем английского каменщика Дж. Аспдина. Аспдин в 1824 г. получил патент на изготовление вяжущего вещества, изготовленного путем обжига смеси извести с глиной. Вяжущее по цвету было сходно с естественным камнем, добываемым в каменоломнях на полуострове Портланд, поэтому и было названо портландцементом. В России аналогичное вяжущее было получено военным техником Е. Челиевым.

Портландцемент — гидравлическое вяжущее вещество, твердеющее в воде и на воздухе, изготовленное путем совместного тонкого измельчения клинкера, гипса и некоторых добавок.

Клинкер получают путем обжига до спекания (1450...1500 °С) сырьевой смеси требуемого состава. В качестве минерального сырья применяют известняковые породы и глину (известняки, мрамор, мергели, глины с высоким содержанием частиц размером менее 0,005 мм).

К клинкеру при помоле добавляют гипсовый камень в количестве 1,5...3,5 % от массы цемента для регулирования его сроков схватывания.

Портландцемент — наиболее распространенное и важнейшее вяжущее вещество, являющееся одним из основных стро-

ительных материалов. Без него невозможно получить различные бетоны, железобетонные конструкции, а также кладочные и штукатурные растворы.

4.4.1. Минералогический состав клинкера портландцемента

Клинкер состоит преимущественно из силикатов кальция $CaOSiO_2$ (70…80 %).

В результате процессов, протекающих при получении клинкера, образуются четыре основных минерала, преимущественное содержание которых определяет название цементов.

Алит ($3CaO \cdot SiO_2$, сокращенно C_3S) — трехкальциевый силикат, в цементе его более 60 %. Алитовый цемент быстро набирает прочность с выделением тепла, поэтому его целесообразно применять в холодное время года, но нельзя использовать в массивных конструкциях (во избежание трещинообразования).

Белит ($2CaO \cdot SiO_2$, сокращенно C_2S) — двухкальциевый силикат, в цементе его более 37 %. Белитовый цемент медленно схватывается и твердеет, особенно при температуре ниже +10 °С, выделяет мало тепла.

Алюминат($3CaO \cdot Al_2O_3$, сокращенно C_3A) — трехкальциевый алюминат; в цементе его до 15 %. Алюминат быстро схватывается и набирает прочность, при твердении выделяет много тепла.

Целит ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$, сокращенно C_4AF) — четырехкальциевый алюмоферрит, в цементе его 10...20 %. Твердеет достаточно быстро, дает высокую прочность и выделяет мало тепла. Не оказывает существенного влияния на свойства портландцемента.

Качество клинкера определяет главные свойства цемента: прочность и скорость ее увеличения, долговечность, стойкость в различных эксплуатационных условиях.

Для получения клинкера исходные сырьевые материалы берут примерно в соотношении 1:3, т.е. на 1 массовую часть глины приходится 3 массовые части известняка. К такому составу очень близок мергель — осадочная горная порода, пред-

ставляющая собой природную смесь известняка с глиной. В сырьевую смесь вводят корректирующие добавки. При этом недостаток кремнезема компенсируют введением диатомита, трепела, опоки; содержание оксидов железа увеличивают добавкой руды или колчеданных огарков.

4.4.2. Химический состав портландцемента

Портландцемент характеризуется постоянством химического состава. Содержание оксидов изменяется в небольших пределах (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Химический состав портландцемента

Оксид	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3
Содержание оксида, %	63…67	21…24	4…7	2…5	Не более 5	1,5...3,5

Перечисленные оксиды в клинкере не находятся в свободном виде, а образуют указанные в п. 4.4.1 минералы кристаллической структуры и некоторые химические соединения, входящие в состав клинкера в виде стекловидной фазы.

Относительное постоянство химического состава портландцемента обусловливает и постоянство его физико-механических свойств, что является важным преимуществом перед некоторыми другими гидравлическими вяжущими (гидравлической известью, романцементом).

4.4.3. Сырьевые материалы

В природе редко встречаются горные породы, химический состав которых после обжига соответствовал бы требуемому химическому составу портландцемента. Поэтому при получении портландцемента сырьевую смесь составляют из двух и более исходных компонентов.

В качестве основных сырьевых материалов, с которыми в приготовленный клинкер вводится оксид кальция CaO, применяют все виды известняков и мела. Вторым компонентом

является глина, с которой вводятся кремнезем SiO_2, глинозем Al_2O_3 и оксид железа Fe_2O_3.

При правильно рассчитанной и тщательно подготовленной к обжигу сырьевой смеси клинкер не должен содержать свободный оксид кальция CaO, так как пережженная (при температуре около 1500 °C) известь, так же как и магнезия MgO, очень медленно гасится, увеличиваясь в объеме, что может привести в последующем к растрескиванию уже затвердевшего бетона.

Минералогический состав клинкера — одна из наиболее полных и надежных его характеристик. Установлено, что почти все строительные свойства портландцемента зависят от минералогического состава клинкера. Именно он дает возможность прогнозировать свойства портландцемента и спроектировать его состав для бетонов, работающих в конкретных эксплуатационных условиях.

4.4.4. Производство портландцемента

Производство портландцемента состоит из следующих технологических операций:

1) приготовление сырьевой смеси и подготовка ее к обжигу;
2) обжиг смеси заданного состава и получение клинкера;
3) охлаждение клинкера и его помол.

В зависимости от вида подготовки сырьевой смеси для обжига существует два способа производства портландцемента: мокрый и сухой.

При *мокром* способе сырьевые материалы измельчают и смешивают в присутствии воды, а смесь обжигают в виде жидкого шлама во вращающихся печах. При *сухом* способе сырье измельчают, смешивают и обжигают в сухом виде.

Выбор способа определяется главным образом качеством сырья:

- если сырье неоднородно по химическому составу, имеет повышенную влажность, крупные включения — целесообразно использовать мокрый способ производства клинкера;
- при использовании сырья, однородного по составу, с малой влажностью и высокой твердостью, применяют сухой способ.

Каждый способ имеет свои преимущества и недостатки. При мокром способе облегчается измельчение материалов, по-

скольку оно совершается в присутствии большого количества воды (40...50 %), при этом быстро достигается хорошая однородность смеси.

Мокрый способ целесообразно использовать при применении в качестве сырья мела, сырой глины, что снижает расход электроэнергии на измельчение сырьевой смеси. При этом способе облегчается транспортирование сырьевой смеси, но расход топлива на обжиг в 1,5–2 раза выше, чем при сухом способе.

Производство портландцемента мокрым способом. Процесс осуществляется по следующей технологической схеме (рис. 4.5).

Сырьевые материалы, доставляемые из карьера на завод в кусках, предварительно измельчают до крупности не более 5 мм: мягкие породы (глина, мел) перемешивают с водой в глиноболтушках, а твердые породы дробят в дробилках.

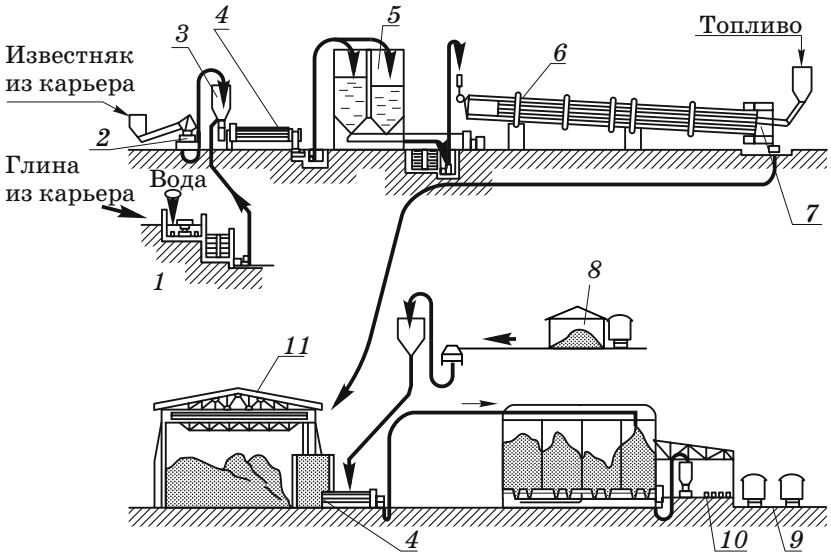


Рис. 4.5. Технологическая схема производства портландцемента мокрым способом:
1 — глиноболтушка; *2* — дробилка; *3* — дозотор; *4* — трубная мельница; *5* — шламбассейны; *6* — вращающаяся печь для обжига; *7* — холодильник; *8* — приготовление гипса и подача его в мельницу; *9* — погрузка в вагоны; *10* — затаривание цемента в мешки; *11* — склад цементного клинкера

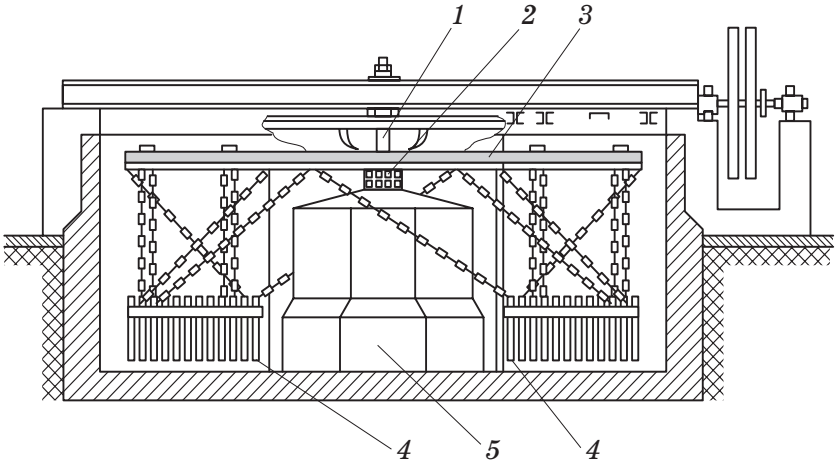


Рис. 4.6. Болтушка для перемешивания глины и мела:
1 — вал; *2* — подшипник; *3* — крестовина; *4* — бороны;
5 — фундамент

Болтушка — круглый железобетонный резервуар (диаметр 5...10 м, высота 2,5...3,5 м), в котором вокруг вертикальной оси вращается крестовина с подвешенными к ней на цепях стальными граблями для измельчения кусков глины (рис. 4.6). Получаемый в глиноболтушке шлам влажностью около 50 % выпускается через отверстие с сеткой и перекачивается в трубную мельницу, куда непрерывно подается известняк.

Трубная мельница — стальной цилиндр длиной до 15 м и диаметром до 3,2 м, вращающийся на полых цапфах, через которые мельницу загружают и выгружают (рис. 4.7). Внутри мельница разделена перегородками с отверстиями на три камеры: в первой и второй помещены стальные или чугунные шары, а в третьей — небольшие цилиндрики. Через полую цапфу шлам поступает в первую камеру трубной мельницы, а затем в другие отсеки. Трубные мельницы являются непрерывно действующими агрегатами.

Из трубной мельницы тонкоизмельченный материал в виде сметанообразной массы (шлама) подается насосом в *шламбас-*

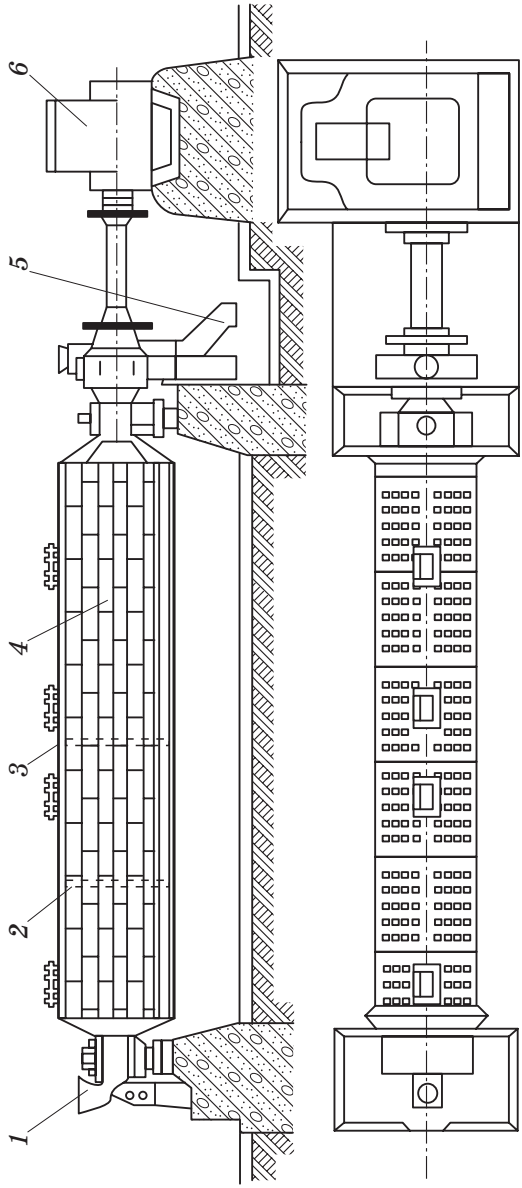


Рис. 4.7. Многокамерная трубная мельница:
1 — загрузочное устройство; *2* — перегородка с решетками; *3* — стальной цилиндр; *4* — стальные плитки; *5* — выгрузочное устройство;
6 — двухступенчатый редуктор

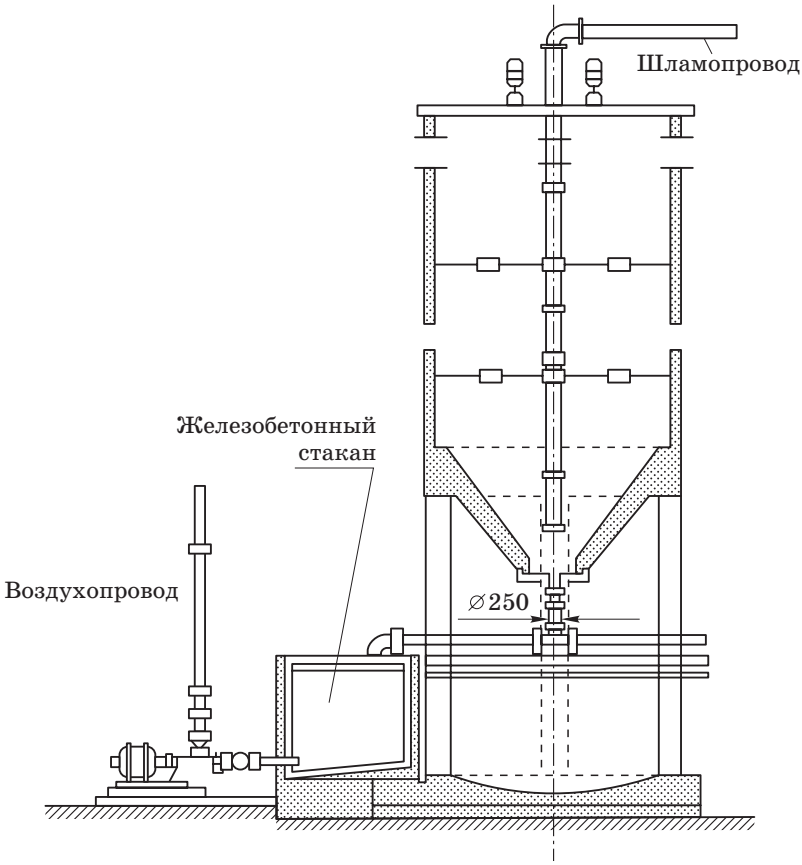


Рис. 4.8. Шламовый бассейн с пневматическим перемешиванием

сейны (рис. 4.8), которые представляют собой железобетонные или стальные резервуары цилиндрической формы. В них окончательно корректируется химический состав шлама и создается определенный его запас для бесперебойной работы печей. Во избежание застывания шлама в бассейне его периодически перемешивают струей сжатого воздуха или механическими мешалками.

Из шламбассейнов шлам поступает в баки, а оттуда подается во вращающуюся печь для обжига (рис. 4.9), которая представляет собой длинный цилиндр из листовой стали, облицованный внутри огнеупорным материалом. Барабан печи

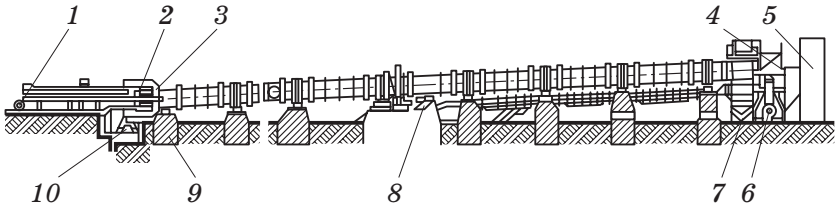


Рис. 4.9. Вращающаяся печь для обжига:
1 — дутьевой вентилятор; *2* — форсунка; *3* — рекуператоры для охлаждения клинкера; *4* — питатель шлама; *5* — дымовая труба; *6* — дымосос; *7* — холодильная камера; *8*— привод; *9* — опора; *10* — транспортеры для клинкера

установлен с наклоном 3…4° и вращается вокруг своей оси со скоростью 0,5…1,5 об./мин. Шлам загружается в верхней стороне печи и передвигается к нижнему ее концу (навстречу факелу сжигаемого топлива). Топливо (газ, мазут, пыль каменного угля) вдувается вместе с воздухом с противоположного нижнего конца печи и сгорает, создавая внутри печи температуру до 1450…1500 °С.

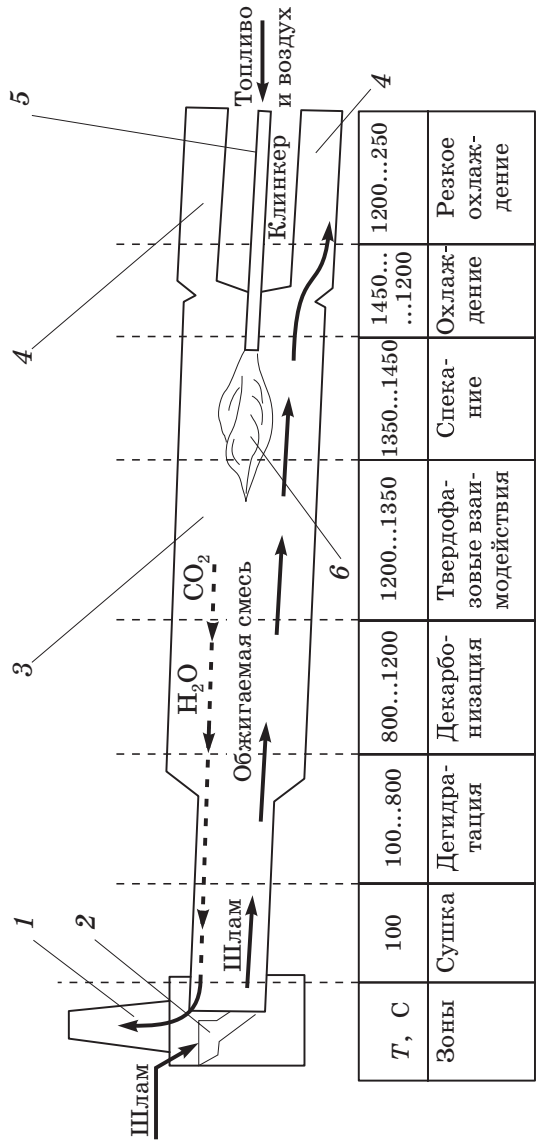
Температурные зоны и процессы, совершающиеся в печи, показаны на рис. 4.10. Дымовые газы удаляются со стороны приподнятого конца печи.

Шлам, перемещаясь вдоль барабана, встречается с горячими газами и постепенно нагревается — в нем совершаются различные физико-химические процессы. Вначале испаряется физически связанная вода, масса высыхает и образуются комья. Затем выгорают органические вещества и начинается дегидратация — удаление химически связанной воды. При температуре 800…950 °С карбонат кальция разлагается по реакции

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2.$$

Углекислый газ удаляется вместе с продуктами сгорания топлива, а CaO в диапазоне температур 1000…1450 °С вступает в химическую реакцию с оксидами глины (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3) и образует так называемый ***портландцементный клинкер*** — пористые гранулы серого цвета.

Получившийся раскаленный клинкер поступает в холодильник, где резко охлаждается движущимся навстречу хо-



Зоны	Сушка	Дегидратация	Декарбонизация	Твердофазовые взаимодействия	Спекание	Охлаждение	Резкое охлаждение
T, С	100	100...800	800...1200	1200...1350	1350...1450	1450...1200	1200...250

Рис. 4.10. Схема вращающейся печи для получения цементного клинкера:
1 — подача дымовых газов на очистку; *2* — течка для подачи шлама; *3* — вращающийся цилиндр; *4* — холодильник; *5* — форсунка; *6* — факел

лодным воздухом. Такое быстрое охлаждение необходимо для того, чтобы аморфизированные минералы сразу не кристаллизовались. Клинкер, выходящий из печи, охлаждается до 100...200 °С в барабанах-рекуператорах и других холодильниках воздухом, идущим навстречу клинкеру или просасываемым через его слой. Холодный воздух, подаваемый через холодильники, охлаждает клинкер и в подогретом состоянии поступает в печь.

Охлажденный клинкер поступает на склад для окончательного охлаждения и вылеживания в течение 15—20 суток. Вылеживание необходимо, чтобы влага воздуха погасила оксид кальция (CaO), если известь содержится в клинкере в свободном состоянии. Это приводит к уменьшению твердости клинкера, что сокращает расход энергии при его помоле, а также уменьшает время помола. На современных высокомеханизированных заводах качество клинкера оказывается настолько высоким, что необходимость вылеживания отпадает.

Качество цементного клинкера характеризуют не только химическим и минеральным составом, но и численными значениями модулей, выражающих соотношения между количествами главнейших оксидов, взятыми в процентах: ОМ = = 1,9...2,4, СМ = 1,7...4,0, ГМ = 1,0...3,0.

Получение портландцемента сухим способом. Данный способ производства цемента наиболее распространен. Он применяется в том случае, когда сырьем являются мергели или смеси твердых известняков и глин небольшой влажности. Тонкоизмельченная сухая сырьевая смесь перед обжигом гранулируется в виде зерен 20...40 мм и подается на обжиг. Схема производства цемента сухим способом (в шахтных печах) приведена на рис. 4.11, а технологическая структурная схема — на рис. 4.12.

В республике построен (введена первая очередь) крупнейший в Европе Белорусский цементный завод (БЦЗ), работающий на местных мело-мергелистых породах по сухому способу. Технология включает двухстадийный помол и сушку сырьевой шихты в комплексном агрегате, состоящем из мельницы сухого самоизмельчения (МСС) «Аэрофол» и молотковой тангенциальной мельницы (ММТ). Для сушки ис-

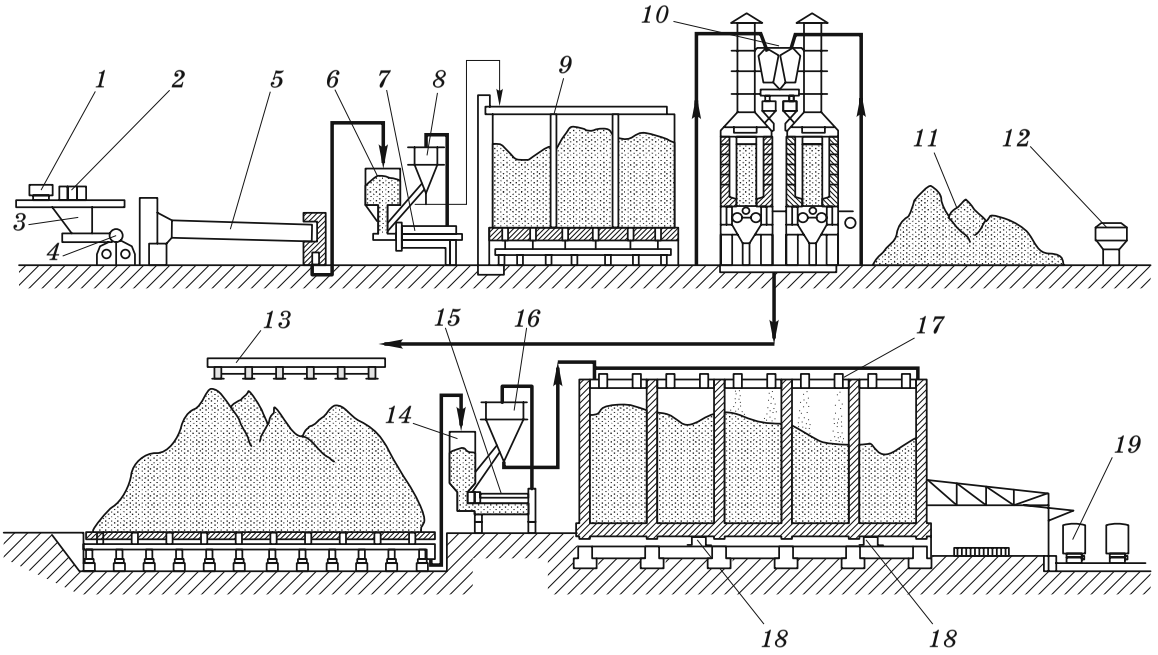


Рис. 4.11. Схема производства портландцемента в шахтных печах (сухим способом): *1* — вагонетка с мергелем; *2* — опрокидные люльки; *3* — бункер для мергеля; *4* — дробилка; *5* — сушильный барабан; *6* — бункер для высушенного материала; *7* — мельница; *8* — сепаратор; *9* — силос для сырцовой муки; *10* — автоматические шахтные печи; *11*, *12* — уголь; *13* — склад клинкера; *14* — бункер для клинкера; *15* — мельница для помола клинкера; *16* — сепаратор; *17* — силос для цемента; *18* — перевозочные весы для насыпи цемента в тару; *19* — вагоны для погрузки цемента

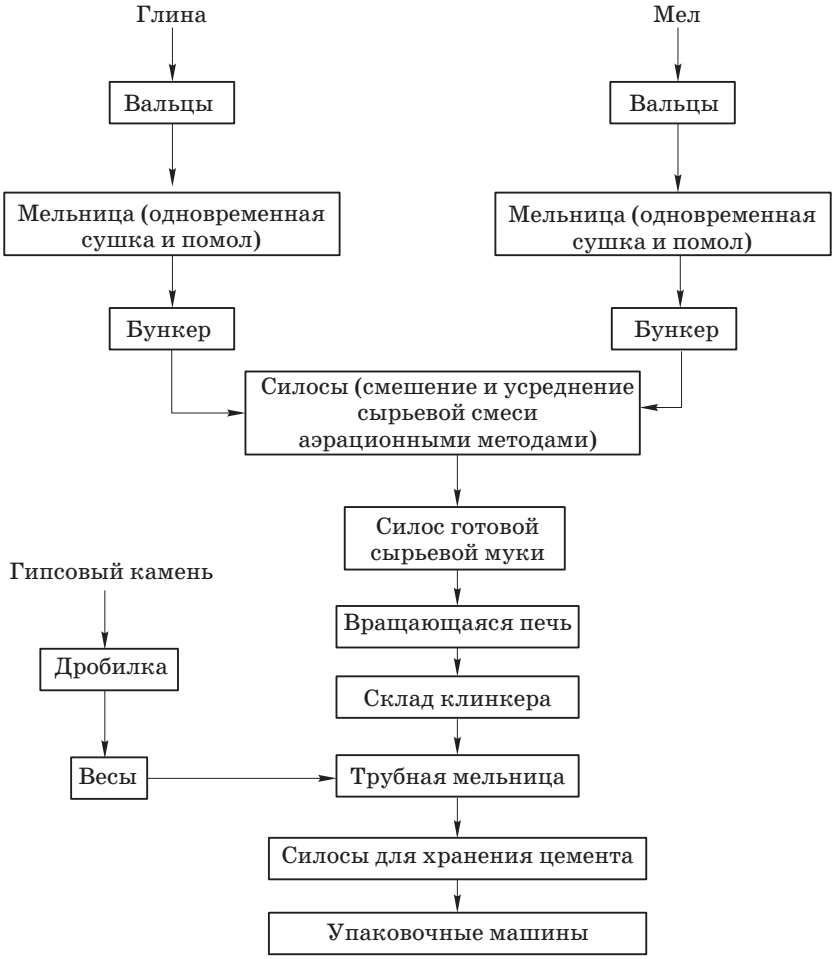


Рис. 4.12. Технологическая схема производства портландцемента сухим способом

пользуется тепло отходящих газов вращающейся печи и газов от автономной топки.

БЦЗ производит клинкер высокой активности (прочностные показатели при 28-суточном твердении превышают 50 МПа). Такое качество клинкера является пока недостижимым для большинства цементных заводов сухого способа производства.

Одним из эффективных новшеств, примененных на БЦЗ, является изменение энергоснабжения, заключающееся в использовании газотурбинных установок (ГТУ). При сухом способе производства цемента работа ГТУ, кроме снижения стоимости потребляемой электроэнергии (ГТУ дополнительно дает часть этой энергии), обеспечивает сокращение расхода топлива на обжиг клинкера за счет использования тепла отходящих газов ГТУ с температурой до 500 °С на сушку сырьевой смеси.

Перспективным оказалось использование на БЦЗ по предложению НИИ строительных материалов щелочного стока производства капролактама (ЩСПК) Гродненского ПРУП «Азот» в качестве интенсификатора помола цемента. Ввод отхода в количестве 0,05...0,1 % в цементные мельницы обеспечил повышение их производительности при работе как в открытом, так и в замкнутом цикле минимум на 10 %. При этом отмечено повышение подвижности получаемого цемента, что улучшило работу упаковочного отделения завода. Невысокая стоимость ЩСПК, по сравнению с импортными ПАВ, обеспечивает его широкое использование при помоле минеральных вяжущих материалов.

Помол клинкера. Это последняя и в то же время самая важная операция в технологическом процессе производства цемента, так как от удельной площади поверхности и зернового состава цемента зависит процесс его твердения и прочность продуктов твердения. В цементе должны преобладать зерна размером 3...30 мкм (55...65 %).

Из холодильника вращающейся печи клинкер подается на клинкерный склад, расположенный вблизи цементно-помольного цеха. После предварительного дробления в дробилке клинкер для тонкого измельчения поступает через дозаторы в трубные мельницы, работающие по открытому или замкнутому циклу. При помоле в замкнутом цикле крупная фракция материала проходит мельницу несколько раз. Мелкая фракция после отделения в сепараторе становится готовым продуктом и больше не возвращается в мельницу.

Для замедления схватывания цемента при помоле клинкера добавляют природный гипс в количестве до 3,5 % по массе в расчете на SO_3. Для интенсификации помола в мельницу вводят вещества, способствующие процессу измельчения, которые предохраняют

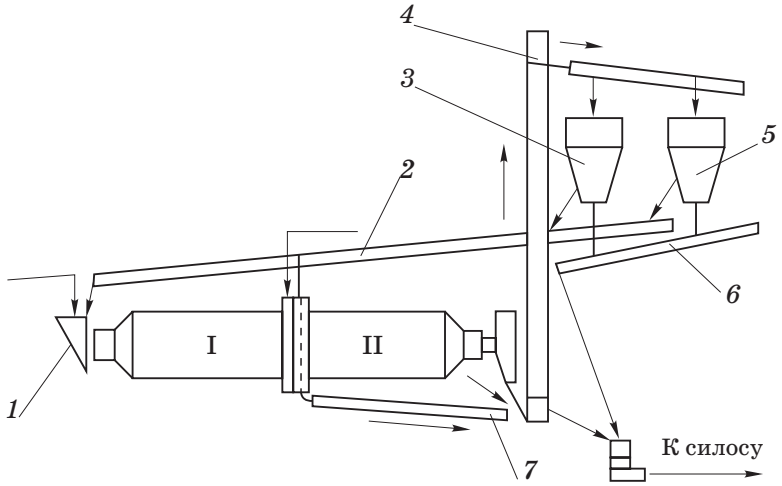


Рис. 4.13. Схема помола клинкера по замкнутому циклу:
I, II — камеры мельницы; *1* — бункер; *2*, *6*, *7* — аэрожелоба;
3, *5* — сепараторы; *4* — элеватор

мелющие тела от налипания частиц (лигносульфонат технический (ЛСТ), мылонафт, триэтаноламин, петролатум, уголь и др.).

При помоле клинкера применяют также сепараторные мельницы, работающие по замкнутому циклу. Схематически устройство сепараторной двухкамерной мельницы показано на рис. 4.13. Клинкер с добавками из бункера поступает в камеру мельницы, а из нее элеватором подается в сепараторы. Крупка из сепараторов направляется на домол во вторую камеру. Отсюда материал элеватором передается в те же сепараторы, из которых крупка снова возвращается во вторую камеру.

Готовый портландцемент при выходе из мельницы имеет высокую температуру (80...120 °С) и направляется пневматическим транспортом для хранения в силосы (рис. 4.14) — железобетонные цилиндры диаметром 8...15 м и высотой 25...30 м. Цемент выдерживают в силосах до его охлаждения. Из силосов, оборудованных пневматическими устройствами, цемент через гибкие рукава-шланги подается в транспортные средства (вагоны, автомобили-цементовозы и др.). Часть цемента упаковывается в многослойные бумажные мешки.

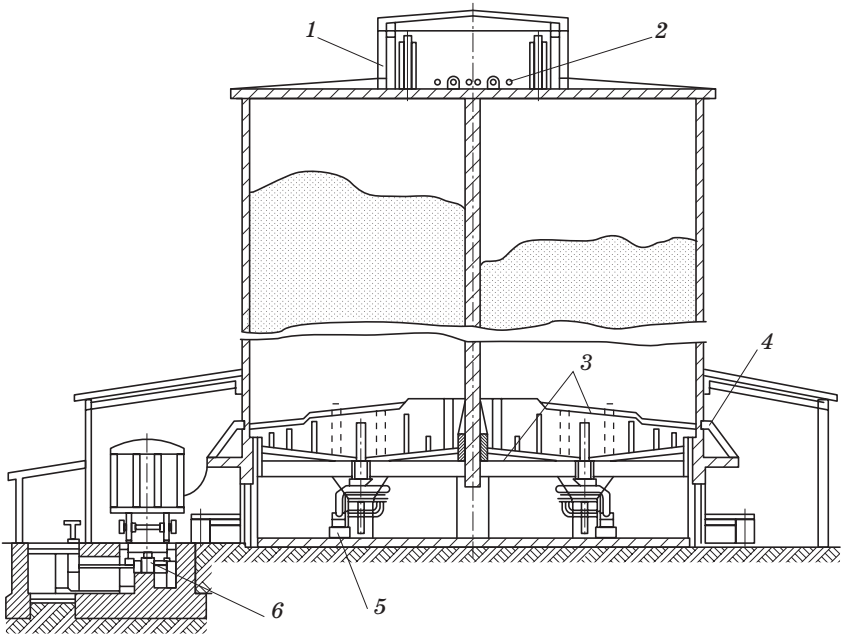


Рис. 4.14. Силосы для хранения цемента:
1 — фильтр для очистки воздуха; *2* — цементопроводы; *3* — пористые плитки; *4* — пневматический разгружатель; *5* — пневматический желоб; *6* — вагонные весы

В паспорте на отправляемый цемент указывают наименование цемента, марку, номер партии, дату изготовления, название завода.

4.4.5. Схватывание и твердение портландцемента

При затворении цемента водой протекают сложные физико-химические процессы. Вначале образуется пластичная масса, которая начинает уплотняться и густеть — этот период называется *началом схватывания*. Затем загустевшая масса утрачивает пластическую консистенцию и постепенно переходит в твердое тело — этот период времени определяет *конец схватывания цемента*.

Взаимодействие цемента с водой приводит к возникновению процессов гидратации цемента — реакции присоединения

молекул воды к этому материалу: вначале без его разложения, а затем с образованием новых химических соединений. Указанные сложные процессы определяются следующими реакциями, происходящими с основными минералами цементного клинкера при соединении с водой затворения:

- трехкальциевый силикат (основной минерал клинкера) гидролитически диссоциирует по реакции

$$3CaO \cdot SiO_2 + nH_2O \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2nH_2O + Ca(OH)_2;$$

- двухкальциевый силикат при взаимодействии с ограниченным количеством воды гидратируется по следующему уравнению:

$$2CaO \cdot SiO_2 + nH_2O \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2nH_2O;$$

- трехкальциевый алюминат очень быстро присоединяет воду:

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O.$$

Присутствующий в цементе гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), вступает в реакцию с гидротрехкальциевым алюминатом и образует труднорастворимое новообразование — гидросульфоалюминат кальция:

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 3(CaSO_4 \cdot 2H_2O) + 19H_2O \rightarrow$$
$$\rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O;$$

- четырехкальциевый алюмоферрит при взаимодействии с водой образует следующие соединения:

$$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + nH_2O \rightarrow$$
$$\rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot nH_2O.$$

Процессу твердения цемента были посвящены исследования А.Л. Ле-Шателье (предложил кристаллизационную теорию твердения). В 1923 г. А.А. Байков развил эти исследования и предложил теорию твердения, которая кратко сводится к следующим трем этапам.

1. *Подготовительный период* — растворение цементных зерен в воде и образование насыщенного раствора. При этом водная среда быстро насыщается продуктами гидролиза и гидратации цемента ($Ca(OH)_2$; $2CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$; $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$ и др).

2. *Период коллоидации* — идет дальнейший процесс растворения и образования новых соединений в коллоидном со-

стоянии, в результате образуется студнеобразная масса (гель); начинается схватывание системы.

3. *Период кристаллизации* — вслед за образованием коллоидных веществ начинаются процессы самоуплотнения геля, образуются кристаллические сростки. Если в этот период вся система не подвергается механическому нарушению, кристаллический сросток образуется в виде монолитного тела. Происходит твердение, масса затворенного цемента превращается в камневидное тело, обладающее значительной прочностью.

На практике все эти процессы налагаются один на другой и протекают одновременно.

Скорость схватывания и твердения цемента зависит от его минералогического состава, тонкости помола, качества воды для затворения, температуры и др. Поэтому в зависимости от этих условий действительный ход процессов (1–3 этапы) будет неодинаков для различных цементов.

Нормальными условиями твердения цементных материалов считают такие, когда температура равна 20±2 °С, а относительная влажность воздуха — 95...100 %. Твердение портландцемента существенно зависит от этих факторов (рис. 4.15). При снижении температуры процесс гидратации замедляется. Происходит недобор прочности (кривая *1*). Для

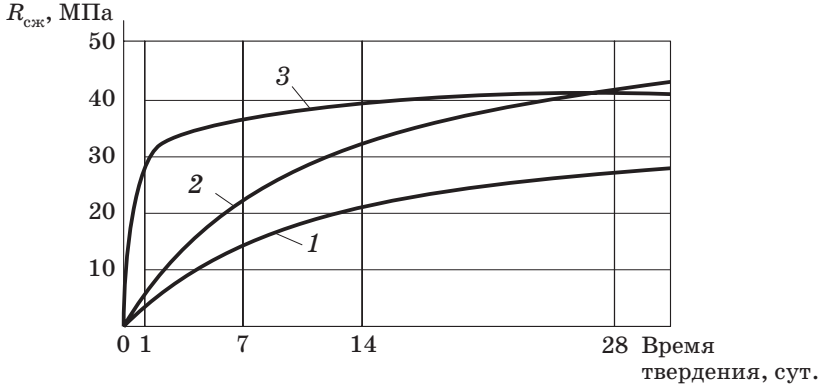


Рис. 4.15. Кривые роста прочности цемента:
1 — твердение при температуре 5 °С; *2* — нормальное твердение при 20 °С; *3* — пропаривание при 85 °С

повышения скорости твердения изделий из бетона их обрабатывают насыщенным паром при температуре 70…95 °С. Это позволяет за 10…16 ч получить отпускную прочность бетона, составляющую 75…100 % от проектной 28-суточной (кривая *3*).

4.4.6. Структура цементного камня

Цементный камень представляет собой сложную систему, которая включает:

- каркас кристаллических сростков новообразований;
- цементный гель, находящийся в стадии продолжающейся кристаллизации;
- непрореагировавшие частицы цементного клинкера;
- частицы химических добавок;
- избыточную воду;
- воздух.

С течением времени в цементном камне увеличивается содержание кристаллической фазы, уменьшается гелевая часть, снижается объем непрореагировавших зерен цементного клинкера.

В связи с тем что для увеличения подвижности смеси при затворении цемента добавляют на 35…60 % больше воды, чем это требуется для протекания процессов гидролиза и гидратации (химически связывается лишь 20…22 %), значительная часть воды остается в цементном камне в свободном состоянии, что способствует увеличению его пористости.

4.4.7. Свойства портландцемента

Строительно-технические свойства портландцемента характеризуются оценочными показателями, относящимися к различным состояниям этого материала: порошку, тесту, цементному камню.

Свойства цементного порошка. К ним относятся плотность и тонкость помола портландцемента.

Плотность портландцемента колеблется в пределах 3050…3200 кг/м^3. Насыпная плотность зависит от степени уплотнения. Для рыхлонасыпанного цемента она составляет

900…1100 кг/м^3, а сильно уплотненного — 1700 кг/м^3. Обычно в расчетах принимают значение плотности 1300 кг/м^3.

Тонкость помола цемента существенно влияет на его свойства. Реакция между цементом и водой происходит на поверхности зерен. Поэтому чем более тонко измолот цемент (больше удельная поверхность зерен), тем быстрее идет гидратация, а следовательно, и нарастание прочности.

Тонкость помола определяют просевом высушенной навески цемента (50 г) через сито с сеткой № 008. Тонкость помола должна быть такой, чтобы при рассеве через это сито проходило не менее 85 % от массы навески.

Удельная поверхность портландцемента заводского помола находится в пределах 2500…3500 см^2/г, а для быстротвердеющего доходит до 6000 см^2/г.

Свойства цемента в тесте. Цементным тестом называют смесь цемента с водой. Такие свойства цемента, как сроки его схватывания, равномерность изменения объема цементного теста при твердении и другие, определяют на тесте унифицированной консистенции, т.е. на тесте *нормальной густоты*.

Нормальную густоту цементного теста определяют при помощи прибора Вика (рис. 4.16). Для этого приготавливают це-

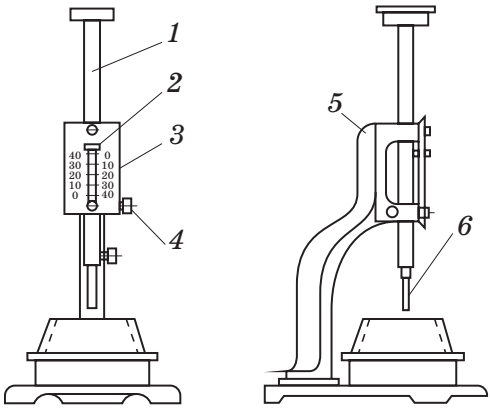


Рис. 4.16. Прибор Вика:
1 — цилиндрический стержень; *2* — указатель для отсчета перемещения стержня; *3* — шкала; *4* — зажимной винт; *5* — обойма станины; *6* — пестик (измеритель густоты)

ментное тесто с некоторым количеством воды и закладывают в кольцо прибора. В конец подвижного стержня вставляют пестик и дают возможность стержню с пестиком свободно погружаться в тесто. Густота считается нормальной, если пестик не доходит до пластинки, на которой установлено кольцо, на 5…7 мм. Для портландцемента нормальная густота находится в пределах 25…30 % воды от массы цемента (так называемая ***водопотребность***).

Начало и ***конец схватывания*** теста нормальной густоты также определяют на приборе Вика, но по глубине проникновения иглы. Начало схватывания должно наступать не ранее чем через 45 мин, конец — не позднее 10 ч от начала затворения. Эти показатели определяют при 20±2 °С. Обычно начало схватывания у портландцемента наступает через 1…2 ч, а заканчивается через 4…8 ч. Портландцемент, применяемый для бетонных покрытий автомобильных дорог, должен иметь начало схватывания не ранее 2 ч с момента его затворения.

Как быстрое, так и медленное схватывание затрудняют и усложняют организацию производства строительных работ. На сроки схватывания портландцемента влияют его минералогический состав, тонкость помола, температура теста, содержание воды и другие факторы.

Свойства цемента в камне. ***Тепловыделение в процессе схватывания и твердения*** цементного теста связано с тем, что все реакции гидратации клинкерных минералов экзотермичны. Количество выделяющегося тепла при этом определяется минералогическим составом клинкера. Тепловыделение основных минералов клинкера в условиях полной гидратации оценивается следующими примерными данными (кДж/кг):

- алюминат C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$) — 1090;
- алит C_3S ($3CaO \cdot SiO_2$) — 670;
- целит C_4AF ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$) — 570;
- белит C_2S ($2CaO \cdot SiO_2$) — 352.

Таким образом, чем выше содержание в цементе C_3A и C_3S, тем больше его тепловыделение.

Тепловыделение цемента существенно повышается и с увеличением тонкости его помола, а также при введении

в его состав химических добавок, ускоряющих процесс гидратации.

Равномерность изменения объема при твердении — одно из главных свойств цемента. В основном все цементы при твердении незначительно изменяют свой объем. При значительном и неравномерном изменении объема затвердевшего камня цемент считают непригодным для строительных целей, особенно для изготовления бетонных и железобетонных изделий. Основной причиной изменения объема является содержание свободных оксидов кальция (CaO) и магния (MgO), гидратация которых после конца схватывания цементного теста сопровождается возникновением в затвердевшем цементном камне больших внутренних напряжений, что приводит к его короблению и растрескиванию.

Испытание на равномерность изменения объема при твердении производится на образцах-лепешках путем их кипячения в воде. Цементы, не выдержавшие испытание, признаются некачественными и не должны применяться в строительстве.

Прочность цементного камня условно определяют по пределам прочности при сжатии и изгибе образцов-балочек размером 40×40×160 мм, приготовленных из цементно-песчаного раствора состава 1:3 (цемент : песок) стандартной консистенции при водоцементном отношении В/Ц = 0,4. Образцы вначале выдерживают на воздухе (1 сутки), а затем в воде — 27 суток. Через 28 суток балочки испытывают на изгиб, а образовавшиеся при этом половинки балочек — на сжатие. Схема испытаний на изгиб показана на рис. 4.17.

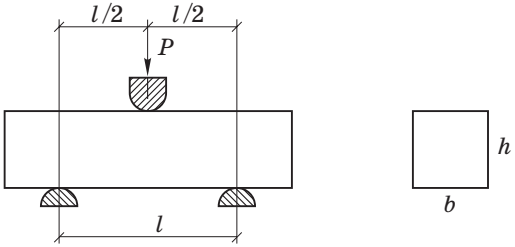


Рис. 4.17. Схема испытания образцов-балочек на изгиб

Предел прочности на изгиб $R_{изг}$ при действии сосредоточенной силы в середине пролета вычисляют по формуле

$$R_{изг} = \frac{3Pl}{2bh^2} \text{ (МПа)}, \quad (4.5)$$

где P — разрушающая (максимальная) нагрузка, Н; l — расстояние между центрами опор, см; b и h — ширина и высота сечения образца, см.

Предел прочности на осевое сжатие $R_{сж}$ вычисляют по формуле

$$R_{сж} = \frac{P}{bh} \text{ (МПа)}. \quad (4.6)$$

Предел прочности на изгиб и сжатие образцов в возрасте 28 сут. с момента изготовления называется ***активностью цемента.***

Марку цемента устанавливают по значениям предела прочности на сжатие и изгиб в соответствии с табл. 4.3. Если одно из них ($R_{сж}$ или $R_{изг}$) меньше указанного в табл. 4.3, то цемент относят к меньшей марке. Например, при испытании получили $R_{сж}$ = 38 МПа и $R_{изг}$ = 5,9 МПа. Следовательно, цемент относят к марке 400 (а не 500).

Таблица 4.3

Прочностные характеристики цементов

Обозначение цемента	Гарантированная марка	Предел прочности, МПа (кгс/см^2)			
		на изгиб в возрасте		на сжатие в возрасте	
		3 сут.	28 сут.	3 сут.	28 сут.
ПЦ-Д0	400	—	5,4 (55)	—	39,2 (400)
	500		5,9 (60)		49,0 (500)
	550		6,1 (62)		53,9 (550)
	600		6,4 (65)		58,8 (600)
ПЦ-Д5 ПЦ-Д20	300	—	4,4 (45)	—	29,4 (300)
	400		5,4 (55)		39,2 (400)
	500		5,9 (60)		49,0 (500)
	550		6,1 (62)		53,9 (550)
	600		6,4 (65)		58,8 (600)
ПЦ-Д20-Б	400	5,9 (40)	5,4 (55)	24,5 (250)	39,2 (400)
	500	4,4 (45)	5,9 (60)	27,5 (280)	49,0 (500)

Продолжение табл. 4.3

Обозначение цемента	Гарантированная марка	Предел прочности, МПа (кгс/см^2)			
		на изгиб в возрасте		на сжатие в возрасте	
		3 сут.	28 сут.	3 сут.	28 сут.
ССПЦ-Д0	400	—	5,4 (55)	—	39,2 (400)
ССПЦ-Д20	400	—	5,4 (55)	—	39,2 (400)
	500		5,9 (60)		49,0 (500)
ШПЦ	300	—	4,4 (45)	—	29,4 (300)
	400		5,4 (55)		39,2 (400)
	500		5,9 (60)		49,0 (500)
ШПЦ-Б	400	5,4 (55)	5,4 (55)	21,5 (220)	39,2 (400)
ССШПЦ	300	—	4,4 (45)		29,4 (300)
	400		5,4 (55)		39,2 (400)
ППЦ	300	—	4,4 (45)	—	29,4 (300)
	400		5,4 (55)		39,2 (400)

Условное обозначение цемента должно состоять:

- из наименования вида цемента: портландцемент (ПЦ), шлакопортландцемент (ШПЦ), стульфатостойкий портландцемент (ССПЦ), пуццолановый портландцемент (ППЦ);

1) марки цемента: 300, 400, 550, 600; разработаны цементы марок 700…1000;

2) обозначения максимального содержания добавок в портландцементе — Д0, Д5, Д20 (соответственно 0; 5; 20 %);

3) обозначения быстротвердеющего цемента — Б;

4) обозначения пластификации или гидрофобизации цемента — ПЛ и ГФ соответственно;

5) обозначения цемента, полученного на основе клинкера нормированного состава, — Н.

Например, портландцемент марки 400 с добавками до 20 %, быстротвердеющий, пластифицированный обозначается: 400-Д20-Б-ПЛ.

В соответствии с ГОСТ 30515–97 предусматривается введение классов цементов (МПа) 22,5; 32,5; 42,5; 52,5.

Обычный портландцемент выпускается двух видов:

- без минеральных добавок;
- с активными минеральными добавками (не более 20 %).

В качестве добавок используются доменные гранулированные и электротермофосфорные шлаки, горные породы осадочного происхождения (диатомиты, трепелы, опоки), глиежи (естественно обожженные глины) и др. Добавки вводятся для повышения водостойкости цемента (для связывания выделяющегося гидроксида в малорастворимых гидросиликатах кальция). Их применение приводит к экономии дорогостоящего клинкера. Применяя минеральные добавки, можно регулировать также ряд других свойств портландцемента: выделение тепла при твердении, плотность цементного камня и др. Виды и состав добавок в портландцементах представлены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Активные добавки в цементах

Обозначение цемента	Активные минеральные добавки, % по массе			
	Всего	В том числе		
		доменные гранулированные шлаки	осадочного происхождения, кроме глиежа	прочие активные, включая глиеж
ПЦ-Д0	Не допускаются			
ПЦ-Д5	До 5	До 5	До 5	До 5
ПЦ-Д20, ПЦ-Д20-Б	5...20	До 20	До 10	До 20
ШПЦ, ШПЦ-Б	20...80	20...80	До 10	До 10
ССПЦ-Д0	Не допускаются			
ССПЦ-Д20	10...20	10...20	5...10	—
ССШПЦ	20...80	20...80	—	—
ППЦ	20...40	—	20...30	25...40

Активность минеральных добавок определяется по количеству поглощенной извести из известкового раствора (мг CaO на 1 г добавки) и составляет:

- у диатомитов, трепелов и опок — 150...400,
- у вулканических пеплов, пемзы и туфа — 50...150,
- трассов — 60...150,
- обожженных глин, топливных шлаков и зол — 50...100.

Добавки с меньшей активностью относятся к *инертным*.

Марка цемента, определяемая прочностью цементного камня, тем выше, чем больше степень гидратации цемента и меньше значение величины В/Ц. За марочную принимается прочность на 28-е сут., однако ее можно определить экстраполяцией на 7-е и 14-е сут. На 7-е сут. прочность цементного камня составляет 50 % от марочной.

Транспортирование и хранение портландцемента могут осуществляться в какой-либо таре (в мешках, банках) или навалом, но в любом случае цемент должен быть защищен от влаги воздуха.

Завод-изготовитель гарантирует соответствие цемента всем требованиям стандарта при соблюдении правил его транспортирования и хранения в течение 45 сут. после отгрузки для быстротвердеющих и 60 сут. для остальных цементов. При длительном хранении цемента он снижает свою активность: прочность портландцемента после трех месяцев хранения понижается на 10...20 %, через год — на 25...40 %.

4.4.8. Коррозия цементного камня и борьба с ней

Бетонные конструкции могут разрушаться под действием природных вод. Разрушение начинается с цементного камня, структурные составляющие которого или растворяются, или вступают в химические реакции с солями и кислотами, содержащимися в воде. Деструктивные процессы объясняются тем, что образующиеся новые химические соединения или «вымываются» водой, или кристаллизуются в цементном камне со значительным увеличением объема, что приводит к возникновению больших внутренних напряжений и разрушению структуры бетона.

По степени агрессивности по отношению к цементобетонному камню природные воды подразделяются:

- на мягкие;

- содержащие агрессивную углекислоту (CO_2);
- содержащие соли серной кислоты (сульфаты);
- содержащие повышенное количество солей магния (Mg);
- содержащие свободные кислоты.

Коррозия мягкими водами. К мягким водам относятся воды, которые не содержат соли кальция и магния или содержат их в незначительном количестве. Вследствие этого они способны растворять $Ca(OH)_2$ (кристаллический сросток цементного камня), что и приводит к его разрушению.

Коррозия водами, содержащими агрессивную углекислоту **(CO_2).** При наличии в природных водах CO_2 происходят следующие процессы. Вначале агрессивная CO_2 соединяется с составной частью цементного камня $Ca(OH)_2$ с образованием известняка:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O,$$

затем при взаимодействии $CaCO_3$ с углекислотой образуется бикарбонат кальция $Ca(HCO_3)_2$, хорошо растворимый в воде:

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O = Ca(HCO_3)_2.$$

Коррозия водами, содержащими сульфаты. При наличии в природных водах солей серной кислоты (сульфатов), протекают следующие реакции:

1) при взаимодействии $Ca(OH)_2$ с сульфатом ($MgSO_4$) образуется гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$):

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4 + 2H_2O = CaSO_4 \cdot 2H_2O + Mg(OH)_2;$$

2) гипс реагирует с гидроалюминатом кальция ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$), содержащимся в цементном камне, с образованием так называемой *«цементной бациллы»* — гидросульфоалюмината кальция ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$), что вызывает значительное увеличение объема цементного камня (в 2,5 раза) вследствие значительных внутренних напряжений и приводит к разрушению бетона:

$$3(CaSO_4 \cdot 2H_2O) + 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 19H_2O = \\ = 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O.$$

В случае достаточно высокой концентрации сульфатов в агрессивных водах в порах бетона образуется большое количество гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). При этом растущие кристаллы гипса вызывают значительные внутренние напряжения в структуре цементного камня и разрушают ее.

Магнезиальная коррозия. При содержании в природных водах солей магния в значительном количестве (более 5000 мг/л) они проникают в цементный камень и, взаимодействуя с $Ca(OH)_2$, образуют легкорастворимый хлорид кальция ($CaCl_2$), который вымывается и разрушает структуру бетона:

$$MgCl_2 + Ca(OH)_2 = Mg(OH)_2 + CaCl_2.$$

При этом труднорастворимый гидрат оксида магния $Mg(OH)_2$ осаждается в порах бетона.

Коррозия водами, содержащими свободные кислоты. Если в природных водах присутствуют свободные кислоты, то они также вступают в реакцию с $Ca(OH)_2$ с образованием легкорастворимых соединений, например $CaCl_2$:

$$2HCl + Ca(OH)_2 = CaCl_2 + 2H_2O.$$

4.5. Специальные виды портландцемента

Для инженерных конструкций, работающих в различных эксплуатационных условиях, требуется производство особых видов цементов, в наибольшей мере отвечающих поставленной цели. Было установлено, что достигнуть этого можно изменением минералогического состава цемента, тонкости помола, введением различных добавок и пр., т.е. путем создания специальных видов портландцемента:

- быстротвердеющего (БТЦ);
- пластифицированного (ППЦ);
- гидрофобного;
- сульфатостойкого;
- дорожного;
- белого и цветного.

Указанные цементы дороже, чем обычный портландцемент. Поэтому рекомендуется применять их только тогда, когда их специфические свойства могут быть использованы с максимальной эффективностью.

4.5.1. Быстротвердеющий портландцемент

Данный вид специального портландцемента отличается более быстрым набором прочности в начальный период твердения. Это объясняется двумя основными факторами:

1) в составе клинкера такого цемента преобладают активные минералы: $3CaO{\cdot}SiO_2$ — 50...55 %, $3CaAl_2O_3$ — 5...10 %;

2) тонкость помола этих цементов характеризуется более высокой удельной поверхностью (3500...5000 $см^2/г$).

По данным А.Д. Ершова, четко прослеживается быстрое нарастание прочности в начальный период (1, 3, 7 сут.) в зависимости от удельной поверхности (табл. 4.5). Причем к 28 сут. прочность у цементов с различной удельной поверхностью почти сравнивается.

Таблица 4.5

Динамика роста прочности цементов в зависимости от удельной поверхности

Удельная поверхность, $см^2/г$	Предел прочности на сжатие, МПа, в возрасте			
	1 сут.	3 сут.	7 сут.	28 сут.
1880	84	260	360	530
3000	147	300	480	570
4000	215	460	535	590

Быстротвердеющий портландцемент (марок 400 и 500) используется при изготовлении сборных железобетонных конструкций из высокопрочных бетонов.

Применение БТЦ вместо обычных портландцементов позволяет сократить продолжительность термовлажностной обработки бетона и уменьшить расход цемента. Однако в ряде случаев применять БТЦ нельзя. Особенность минералогиче-

ского состава его клинкера (много C_3S и C_3A) при гидратации приводит к образованию значительного количества $Ca(OH)_2$ и $CaOAl_2O_3 \cdot H_2O$, что делает цементный камень нестойким к химической коррозии. В связи с этим БТЦ используют только для изготовления конструкций, эксплуатирующихся в неагрессивной среде. Его также не рекомендуется применять при изготовлении массивных конструкций из-за высокой экзотермичности в процессе нарастания прочности.

БТЦ с большой тонкостью помола быстро снижает свою активность при хранении. При хранении в течение 1–3 мес. БТЦ утрачивает свойство быстро твердеть и набирает прочность, как обычный портландцемент.

4.5.2. Пластифицированный портландцемент

Данный вид цемента изготавливают совместным помолом клинкера портландцемента, активных добавок, гипса и ПАВ. В качестве пластифицирующих добавок обычно используют сульфитно-спиртовую барду (ССБ) в количестве 0,15...0,25 % (в пересчете на сухое вещество барды) к цементу. Марки такого цемента 400 и 500. Введение пластифицирующих добавок придает цементному тесту бóльшую подвижность, а это позволяет снизить количество воды, что, в свою очередь, дает возможность уменьшить расход цемента в растворах и бетонах.

По представлению академика П.А. Ребиндера, молекулы ССБ сорбируются на поверхности частиц цемента и образуют на них коллоидные гидрофильные пленки, способствующие более полному смачиванию водой частиц цемента и сдерживающие их агрегирование. При затворении цемента водой пленки ССБ обеспечивают повышение пластичности цементного теста.

Бетоны с ППЦ в первые сроки твердения чувствительны к просыханию, поэтому нуждаются в тщательном соблюдении влажностного режима при их уходе.

Применение ППЦ эффективно при изготовлении бетонных конструкций, подвергающихся попеременному увлажнению-просыханию и замораживанию-оттаиванию (например, бетоны для мостов, путепроводов, покрытий дорог и аэродромов).

4.5.3. Гидрофобный портландцемент

Гидрофобный портландцемент изготавливают совместным помолом цементного клинкера, гипса и специальных гидрофобных добавок (мылонафта, асидола, петралатума*, олеиновой кислоты и др.) в количестве 0,1...0,3 %. Добавки, сорбируясь на поверхности частиц цемента, создают гидрофную пленку, которая снижает способность цемента взаимодействовать с влажным воздухом. Поэтому гидрофобный цемент сохраняет свою активность и не комкуется при хранении.

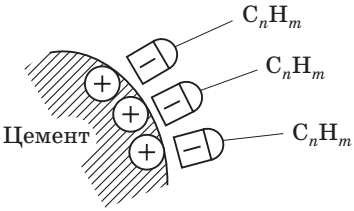


Рис. 4.18. Схема взаимодействия гидрофобной добавки на поверхности цементной частицы. Цемент имеет электрический заряд «+», ПАВ (полярная часть молекулы) — «–»; C_nH_m — углеводородный радикал

Механизм гидрофобизации поверхности частиц цемента заключается в следующем. Гидрофобные добавки являются типичными ПАВ, молекулы которых состоят из полярной (имеющей электрический заряд) и неполярной (углеводородной) группы (рис. 4.18).

Неполярные (углеводородные) группы молекул ПАВ обладают водоотталкивающими свойствами, поэтому цементные зерна не смачиваются водой и цемент становится гидрофобным. Образовавшиеся на поверхности цементных частиц тонкие (мономолекулярные) защитные пленки ПАВ легко «снимаются» при перемешивании бетонных смесей, что и обеспечивает нормальную гидратацию цемента и твердение цементного камня в бетоне.

После затвердевания гидрофобизирующие добавки проникают в капилляры цементного камня и уменьшают капиллярный подсос влаги. Гидрофобный цемент выпускается тех же марок, что и портландцемент. Его применяют в гидротехническом, дорожном и аэродромном строительстве.

---

* Мылонафт и асидол — продукты, получающиеся при очистке нефтяных дистиллятов. Петралатум — вазелинообразный нефтепродукт, выделяемый при парафинизации нефтяных дистиллятов.

4.5.4. Сульфатостойкий портландцемент

Этот вид специальных цементов представляет собой гидравлическое вяжущее вещество, полученное тонким помолом клинкера, в котором ограничивается содержание C_3S (не более 50 %), C_3A (не более 5 %), $C_3A + C_4AF$ (не более 22 %). При таком минералогическом составе цемента уменьшается возможность образования в цементном камне бетона гидросульфоалюмината кальция ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$) под действием воды, содержащей сульфаты (подробнее см. п. 4.4.8). Таким образом, применение такого цемента повышает стойкость бетона к сульфатной коррозии.

4.5.5. Цемент для бетона дорожных и аэродромных покрытий

Дорожный цемент применяют для изготовления бетона дорожных и аэродромных покрытий, железобетонных и безнапорных труб, железобетонных шпал, мостовых конструкций, стоек опор высоковольтных линий электропередачи.

Для всех вышеперечисленных изделий можно применять портландцементы 400-Д0-Н и 500-Д0-Н. Для труб, шпал, опор мостовых конструкций независимо от вида добавки применяется ПЦ 500-Д5-Н.

Для бетона дорожных и аэродромных покрытий можно использовать цементы ПЦ 400-Д20-Н и ПЦ 500-Д20-Н при применении в качестве добавки доменного гранулированного шлака не более 15 %. Начало схватывания портландцемента для бетона дорожных и аэродромных покрытий должно наступать не ранее 2 ч, портландцемента для труб — не ранее 2 ч 15 мин от начала затворения цемента. Не допускается наличие ложного схватывания.

Особенностью этого вида портландцемента является повышенное содержание в нем C_3S и CaAF, ограниченное количество алита (C_3A) — не более 8 % (вместо 60 % в обычном портландцементе), гипса —1...3 %, MgO — не более 5 %, инертных микронаполнителей — не более 5 %. Тонкость помола должна быть такова, чтобы 85 % частиц цемента проходило через сито № 008.

Дорожный портландцемент пластифицируют и вводят воздухововлекающие добавки для повышения морозостойкости.

4.5.6. Белый и цветные портландцементы

Белый портландцемент получают измельчением белого маложелезистого клинкера, белых минеральных добавок (белого диатомита не более 6 %) и гипса. Выпускают белый цемент марок 400 и 500. Применяют для архитектурно-отделочных работ и получения окрасочных составов.

Цветные портландцементы получают путем совместного помола белого клинкера (не менее 80 %), минеральных (не более 15 %) и органических красителей, гипса и активной минеральной добавки (не более 6 %). Органические пигменты добавляют в количестве не более 0,6 % от массы цемента. Они должны быть свето- и щелочестойкими. Введение красителей снижает активность портландцемента. Цветной портландцемент выпускают марок 300, 400 и 500.

4.6. Пуццолановые портландцементы

Пуццолановый портландцемент — гидравлическое вяжущее, получаемое совместным помолом портландцементного клинкера, активных минеральных добавок (20...50 %) и природного гипса. Гипса должно быть столько, чтобы содержание SO_3 в цементе не превышало 3,5 %.

Необходимость введения в цемент минеральных добавок объясняется тем, что при твердении обычного портландцемента образуется свободная гидратная известь $Ca(OH)_2$, которая снижает устойчивость цементного камня в проточных напорных и слабоминерализованных водах. Для нейтрализации (снижения количества) гидратной извести вводят добавки, содержащие активную (растворимую) форму кремнезема (SiO_2), который при взаимодействии с $Ca(OH)_2$ образует нерастворимые гидросиликаты кальция ($CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$):

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + nH_2O \rightarrow CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O.$$

Аналогичная реакция проходит при взаимодействии с $Ca(OH)_2$ активного глинозема.

Частицы активной добавки при взаимодействии с $Ca(OH)_2$ во влажной среде набухают, что вызывает уплотнение бетона и его водонепроницаемость. Кроме того, пуццолановый портландцемент является сульфатостойким, поскольку содержание трехкальциевого алюмината C_3A ($CaO \cdot Al_2O_3$) в клинкере, используемом для получения этого цемента, ограничено до 8 %.

Активные минеральные добавки известны с давнего времени. Еще в Древнем Риме для придания гидравлических свойств воздушной извести, к ней добавляли измельченный слабообожженный керамический бой, а позже — вулканический пепел, который добывали вблизи г. Поццуоли (отсюда и появился термин «пуццоланы»).

Активные добавки по происхождению делят на *природные* и *искусственные*, а по химическому составу — на *кислые* ($M < 1$) и *основные* ($M \geq 1$). Модуль M определяется по формуле

$$M = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}. \qquad (4.7)$$

К *природным* активным добавкам относятся следующие горные породы:

- трепел — сильнопористая, богатая аморфным кремнеземом порода (70...90 % SiO_2);
- диатомит — пористая порода, содержащая до 95 % аморфного кремнезема;
- опока — сильнопористая порода с содержанием до 80 % аморфного кремнезема.

К природным добавкам вулканического происхождения относятся вулканические пеплы, туфы, пемзы и др. По химическому составу вулканические добавки состоят в основном из кремнезема и глинозема (70...90 %).

К *искусственным* добавкам относятся отходы промышленности: доменные гранулированные шлаки, зола от сжигания бурых углей, торфа, горючих сланцев, цемянки — молотый бой керамических изделий (кирпич, черепица и др.).

Допустимое количество применяемых добавок в различных цементах приведено в табл. 4.4.

Водопотребность пуццоланового портландцемента зависит от вида добавки. При использовании мягких пористых диатомитов количество воды для получения теста нормальной густоты составляет 30...40 % (у обычного портландцемента — 22...30 %). Повышенный расход воды вызывает необходимость увеличивать расход пуццоланового портландцемента на 15...20 % по сравнению с портландцементом той же марки.

Кроме того, бóльшая водопотребность влечет за собой понижение морозостойкости. Однако плотность и водонепроницаемость бетонов на пуццолановом портландцементе выше плотности и водонепроницаемости бетонов на обычном портландцементе. Это объясняется набуханием минеральной добавки при твердении бетона в воде. Отсюда следует, что твердеть пуццолановый портландцемент должен во влажных условиях. При твердении на воздухе пуццолановый портландцемент дает большие усадочные деформации, наблюдается снижение прочности.

Пуццолановый портландцемент твердеет медленнее, чем обычный. В начальные сроки он обладает меньшей прочностью, чем портландцемент той же марки. Однако в дальнейшем прочность пуццоланового портландцемента становится равной и даже превышает ее, причем чем активнее добавка, тем в более короткий срок это происходит.

При понижении температуры твердение пуццоланового портландцемента замедляется сильнее, чем твердение обычного портландцемента. Повышение же температуры при достаточной влажности приводит к более интенсивному твердению.

При твердении пуццоланового портландцемента выделяется меньше тепла, что позволяет использовать его для сооружений массивных бетонных конструкций.

При длительном хранении активность пуццоланового портландцемента снижается быстрее, чем обычного портландцемента, вследствие большей гигроскопичности активных минеральных добавок.

Сроки схватывания пуццоланового портландцемента такие же, как и сроки схватывания обычного портландцемента.

Пуццолановый портландцемент выпускается марок 300 и 400. Его применяют для подводных и подземных бетонных и железобетонных конструкций, подвергающихся действию пресных и сульфатных вод, а также для массивного бетона гидротехнических сооружений. Его можно использовать для конструкций и растворов, находящихся в условиях повышенной влажности.

Вследствие пониженной морозостойкости и воздухостойкости пуццолановый портландцемент не рекомендуется применять в наземных бетонных и железобетонных кнструкциях в условиях воздушного твердения, а также для тех частей сооружения, которые находятся на переменном уровне воды (в условиях попеременного увлажнения и высыхания, замораживания и оттаивания).

Пуццолановый портландцемент получают по следующей схеме (рис. 4.19).

Пуццолановые портландцементы имеют следующие *преимущества* по сравнению с обычным портландцементом:

- более высокая водостойкость цементного камня;
- пониженное тепловыделение при схватывании и твердении;

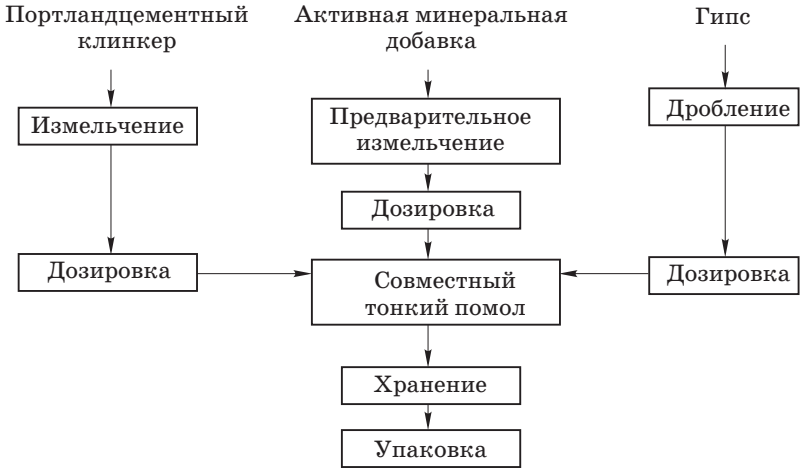


Рис. 4.19. Схема получения пуццоланового портландцемента

- повышенная стойкость к отдельным видам коррозии (в частности, к сульфатной);
- более высокая водонепроницаемость;
- более низкая себестоимость.

Однако ему присущи и недостатки:

- повышенная водопотребность;
- замедленное нарастание прочности бетона во времени (особенно при твердении на воздухе);
- пониженная морозостойкость.

Тонкость помола и сроки схватывания пуццоланового портландцемента такие же, как у обычного портландцемента.

4.7. Местные вяжущие материалы

Местные вяжущие материалы могут быть изготовлены путем тщательного перемешивания воздушной извести (15...25 %) с тонкомолотой активной гидравлической добавкой (75...80 %) или совместным помолом с добавлением не более 5 % гипса. В зависимости от качества и вида добавки выделяют цементы: известково-кремнеземистые, нефелиновые (тонкий помол нефелинового шлака 65 %, извести 15 % и гипса 5 %), известково-трепельные, известково-зольные, известково-глинистые.

Они медленно схватываются и твердеют, обладают большой водопотребностью. При температуре ниже 10 °С их не следует применять без искусственного прогрева.

Бетонные изделия с использованием этих цементов при автоклавной обработке (давлении 0,9 МПа и температуре 180 °С) быстро твердеют, достигая прочности 20...40 МПа в результате взаимодействия гидрата оксида кальция с кремнеземом и образования гидросиликатов кальция. Интенсивность процесса твердения зависит от тонкости помола и режима автоклавной обработки.

В зависимости от свойств эти цементы применяют для приготовления строительных растворов и низкомарочных бетонов.

4.8. Шлаковые цементы

Огромные запасы отходов металлургической промышленности (шлаки) нашли широкое применение в производстве цементов.

4.8.1. Шлакопортландцемент (ШПЦ)

Шлакопортландцемент — это гидравлическое вяжущее, получаемое путем совместного тонкого помола портландцементного клинкера (до 40 %), доменного гранулированного шлака (30...60 %) и гипса (до 3 %). Его можно также получать тщательным перемешиванием тех же материалов, измельченных раздельно.

Этот вид цемента является разновидностью пуццоланового, тонкость помола, как у портландцемента. Начало схватывания не ранее 45 мин, конец — не позднее 10 ч. Прочность ШПЦ на изгиб 4,4...5,9 МПа, на сжатие — 29,4...49 МПа.

Шлакопортландцемент твердеет медленно. При пониженной температуре твердение замедляется, при повышенной (в камерах и автоклавах) — ускоряется. Используют следующие условия твердения: при нормальной температуре, при пропаривании и в автоклаве (170 °С, 8 МПа).

Шлакопортландцемент дешевле, чем обычный портландцемент, примерно на 20 %, в то время как их свойства достаточно близки.

Шлакопортландцемент выпускается марок ШПЦ-300, ШПЦ-400, ШПЦ-500. По сравнению с портландцементом он менее морозостоек (Мрз 100). Поэтому его не рекомендуется применять для конструкций, к которым предъявляются высокие требования по морозостойкости, а также к работающим в режиме систематического увлажнения-высыхания и замораживания-оттаивания.

Шлакопортландцемент применяют для бетонных и железобетонных подземных, надземных и подводных сооружений, подвергающихся действию пресных и минерализованных вод, а также для массивного бетона гидротехнических сооружений. Шлакопортландцемент более низких марок может быть ис-

пользован для строительных растворов, более высоких — для производства бетонных и железобетонных сборных конструкций с применением тепловлажностной обработки.

Выпускают также *быстротвердеющий шлакопортландцемент* (ШПЦ-Б) марки 400, отличающийся более высокой тонкостью помола (до 5000 $см^2/г$) и меньшим содержанием шлака. Он характеризуется повышенной сульфатостойкостью, водонепроницаемостью, морозостойкостью и рекомендуется к применению в подводных и подземных сооружениях.

Быстротвердеющий шлакопортландцемент на третьи сутки твердения раствора характеризуется прочностью на сжатие 21,5 МПа, на изгиб — 5,4 МПа; на 28-е сутки — соответственно 39,2 и 5,4 МПа.

Основным сырьевым материалом для производства шлаковых цементов являются ***доменные гранулированные шлаки***. По химическому составу они близки портландцементу, но содержат меньше CaO и больше SiO_2 и Al_2O_3.

Основными оксидами, образующими минералы шлака, являются CaO (30...50 %), SiO_2 (28...30 %), Al_2O_3 (8...24 %), MgO (1...19 %), суммарное содержание которых обычно больше 90 %. В зависимости от соотношения между основными и кислотными оксидами доменные шлаки делятся на осно́вные и кислые. При этом определяется модуль основности M [см. формулу (4.7)]. Если $M > 1$, шлаки относятся к основным, если $M < 1$ — к кислым.

Главный показатель при оценке качества шлаков — коэффициент качества K. Для шлаков с содержанием MgO до 10 % он определяется формулой

$$K = \frac{\%\left(\mathrm{CaO} + \mathrm{Al_2O_3} + \mathrm{MgO}\right)}{\%\left(\mathrm{SiO_2} + \mathrm{TiO_2}\right)}, \qquad (4.8)$$

При содержании MgO более 10 % применяется формула

$$K = \frac{\%\left(\mathrm{CaO} + \mathrm{Al_2O_3} + 10\right)}{\%\left(\mathrm{SiO_2} + \mathrm{TiO_2} + \left(\mathrm{MgO} - 10\right)\right)}. \qquad (4.9)$$

Гидравлическая активность возрастает с увеличением значений этих коэффициентов.

При быстром охлаждении (холодной водой, воздухом) в процессе грануляции шлаки приобретают стекловидную структуру, в результате чего их химическая энергия остается в потенциальном состоянии. Поэтому гранулированные доменные шлаки при совместном тонком помоле с возбудителями: щелочными ($Ca(OH)_2$, $Mg(OH)_2$) или сульфатными ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) — выявляют скрытую химическую энергию и приобретают способность при затворении водой схватываться и затвердевать. Эта особенность доменных шлаков широко используется в производстве шлаковых бесклинкерных цементов.

4.8.2. Известково-шлаковые и сульфатно-шлаковые цементы

Шлаковые (бесклинкерные) цементы изготавливаются путем совместного помола доменных гранулированных шлаков (до 90 %) с добавками извести, обожженного доломита и гипса. Это самый дешевый вид цементов, поскольку не требует добавления дорогих компонентов (необходимы лишь сушильные и помольно-смесительные установки).

Известково-шлаковый цемент изготавливают путем тонкого помола смеси доменного гранулированного шлака и воздушной извести (в основном негашеной CaO) в количестве 20...30 % с добавкой гипса (3...5 %). Он медленно схватывается и медленно твердеет, быстро утрачивает активность при хранении (рекомендуется проверять качество каждые два месяца). Эти цементы применяют для приготовления строительных растворов и бетонов низких марок (50, 100, 150, 200).

Сульфатно-шлаковый цемент — продукт совместного тонкого помола доменного гранулированного шлака (75...85 %) и гипса (15...20 %) с добавками портландцементного клинкера (до 5 %) или извести (до 2 %). Это медленнотвердеющее вяжущее марок М150, М200 и М300. Сроки схватывания и твердения те же, что и у известково-шлакового цемента. Процесс твердения этого цемента ускоряют пропариванием, автоклавной обработкой или добавками $CaCl_2$. Применяют для приготовления строительных растворов и бетонов для подземных и подводных сооружений, в том числе подвергающихся воздействию сульфатных вод или вод, содержащих CO_2.

Сульфатно-шлаковый цемент — самый дешевый цемент вследствие очень малого содержания в нем активирующей добавки (5...8 % ангидрита и 5...8 % обожженного доломита), остальная часть — доменный гранулированный шлак в количестве 85...95 %.

4.9. Глиноземистые (алюминатные) цементы

Глиноземистый цемент — это быстротвердеющее и высокопрочное гидравлическое вяжущее вещество. Его изготавливают тонким измельчением клинкера, получаемого обжигом до спекания сырьевой смеси из известняка и глиноземистого сырья (например, бокситов $Al_2O_3 \cdot nH_2O$), содержащего до 50 % Al_2O_3, до 45 % CaO, до 15 % SiO_2, до 15 % Fe_2O_3 и других оксидов (железа, магния и др.).

Основным минералом клинкера для этого цемента является однокальциевый алюминат ($CaO \cdot Al_2O_3$).

4.9.1. Особенности структурообразования и свойства

Глиноземистый цемент через сутки твердения набирает прочность, составляющую более 85 % марочной. Это объясняется тем, что гидратация $CaO \cdot Al_2O_3$ в глиноземистом цементе быстро протекает по схеме

$$CaO \cdot Al_2O_3 + 10H_2O = CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O,$$

а далее идет реакция перекристаллизации:

$$2(CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O) = 2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O + 2Al(OH)_3 + 9H_2O.$$

Первой особенностью гидратации глиноземистого цемента является то, что процесс перекристаллизации однокальциевого алюмината в соответствующие кристаллогидраты протекает с большой скоростью (образование кристаллов из пересыщенных растворов завершается за очень короткое время).

Вторая особенность гидратации однокальциевого алюмината — высокая экзотермичность, определяющая значительное тепловыделение в процессе схватывания и твердения глиноземистого цемента. При этом тепловой эффект полностью

проявляется в первые часы взаимодействия цементов с водой. Поэтому глиноземистый цемент нельзя использовать для бетонирования массивных конструкций, где возможен саморазогрев бетона, а также в условиях жаркого климата.

Третьей особенностью гидратации однокальциевого алюмината является то, что в результате не образуется гидроксид кальция $Ca(OH)_2$. Поэтому цементный камень на глиноземистом цементе значительно лучше сопротивляется действию минерализованных вод. Однако бетоны на глиноземистом цементе разрушаются под действием воды, содержащей свободные кислоты.

Сроки схватывания глиноземистого цемента почти такие же, как и у портландцемента: начало — не ранее 30 мин, конец — не позднее 12 ч (обычно 4...5 ч). После схватывания прочность нарастает лавинообразно (табл. 4.6).

Таблица 4.6

Динамика роста прочности глиноземистого цемента в зависимости от его марки

Марка цемента	Предел прочности при сжатии, МПа	
	через 1 сут.	через 3 сут.
400	25	40
500	28	50
600	55	60

Глиноземистый цемент выпускают марок 400, 500, 600.

Усадка этого вида цемента при твердении на воздухе значительно ниже, чем у портландцемента (в 3–5 раз), а пористость ниже примерно в 1,5–2 раза. Это объясняется тем, что при одинаковой с портландцементом водопотребности глиноземистый цемент при твердении химически связывает 30...45 % воды от массы цемента, а портландцемент только около 20 %. Нормальными условиями твердения считаются такие, когда температура бетона (раствора) на глиноземистом цементе не превышает 25 °С.

4.9.2. Применение глиноземистого цемента

Глиноземистый цемент в 3–4 раза дороже портландцемента. Поэтому его следует применять только в следующих случаях:

1) портландцемент не обеспечивает требуемой долговечности бетонных и железобетонных сооружений;

2) требуется быстрый ввод сооружений в эксплуатацию (аварийные, срочные работы, зимнее бетонирование).

При твердении глиноземистого цемента в короткий промежуток времени выделяется большое количество тепла: за первые сутки 70...80 % всего тепла — примерно 100 кал/г, тогда как при твердении портландцемента такое количество тепла выделяется за 7 сут.

Нельзя использовать глиноземистый цемент для конструкций, в которых температура бетона в результате тепловыделения или внешнего воздействия может подняться выше 25...30 °С. Работа с глиноземистым цементом требует большого внимания, квалификации и опыта.

Глиноземистый цемент обладает высокой прочностью только в том случае, если он твердеет при умеренных температурах (не свыше 25 °С). Превышение этого порога отрицательно сказывается на твердении и прочности глиноземистого цемента из-за перекристаллизации двухкальциевого гидроалюмината в трехкальциевый. Лучше всего глиноземистый цемент твердеет при температуре 15...18 °С во влажной среде. Тепловлажностная обработка, пропаривание и запаривание в автоклаве снижают прочность изделий.

Глиноземистый цемент целесообразно применять в тех случаях, когда можно эффективно использовать его положительные свойства — быстрое твердение, высокую сульфатостойкость. Его используют при скоростном строительстве, аварийных работах, зимнем бетонировании, строительстве не массивных сооружений, подвергающихся воздействию минерализованных вод и сернистых газов, а также попеременному замораживанию и оттаиванию, увлажнению и высыханию, для тампонирования нефтяных и газовых скважин, приготовления жаростойких бетонов и расширяющихся цементов различных видов.

4.9.3. Ангидритовый глиноземистый цемент и шлакоглиноземистый цемент

Ангидритовый глиноземистый цемент (АГ-цемент) получают путем смешения глиноземистого цемента с добавкой ангидрита (предложен академиком П.П. Будниковым). Добавка ангидрита ($CaSO_4$) придает цементу свойства нормально твердеть и при повышении температуры более 25 °С. Этот цемент выпускают марок 300, 400, 500 и 600.

Шлакоглиноземистый цемент — продукт тонкого помола клинкера глиноземистого цемента с добавкой доменного гранулированного шлака (не более 60 %). Выпускается марок 300 и 400. Этот цемент применяют в низкомарочных бетонах (до 200), которые нормально наращивают прочность при повышенных температурах (более 25 °С), а также в бетонах конструкций, которые работают в агрессивных средах.

4.10. Расширяющиеся и безусадочные цементы

Бетоны на основе ранее рассмотренных гидравлических вяжущих при твердении на воздухе уменьшаются в объеме, т.е. их твердение вызывает *усадку* — крайне негативное явление, сказывающееся на качестве готовых конструкций.

Объемные усадочные деформации — одна из главных причин появления в бетоне трещин, снижающих долговечность инженерных сооружений. В связи с этим в настоящее время применяют новые виды цементов, процесс твердения которых в начальный период сопровождается либо увеличением объема цементного камня (так называемые *расширяющиеся* цементы), либо компенсированием усадки цемента (*безусадочные цементы*).

Суть этих явлений заключается в следующем. При гидратации всех минеральных вяжущих их абсолютный объем вследствие химической контракции уменьшается. В случае же применения расширяющегося цемента его объем при затворении водой увеличивается. Такое «неожиданное» увеличение объ-

ема может происходить только при условии соблюдения следующего неравенства:

$$\frac{Ц}{\rho_ц} + В < \frac{Ц_1}{\rho_ц} + В_1 + \frac{(Ц - Ц_1) + (В - В_1)}{\rho_г} + \alpha, \qquad (4.10)$$

где Ц — масса цемента, г; $\rho_ц$ — плотность цемента, г/см^3; В — масса воды, г; $Ц_1$ — масса цемента, не вступившего в реакцию с водой, г; $В_1$ — масса воды, не вступившей в реакцию с цементом, г; $\rho_г$ — средняя плотность продуктов гидратации цемента, г/см^3; α — объем пор цементного камня, см^3.

Из приведенного неравенства следует, что расширение цементного камня должно сопровождаться увеличением объема пор вследствие «раздвижки» гидратирующих цементных зерен, что и учитывается увеличивающимся объемом пор цементного камня (α). По мнению П.П. Будникова и И.В. Кравченко, такая раздвижка вызывается значительным кристаллизационным давлением растущих кристаллов «цементной бациллы» — гидросульфоалюмината кальция ($3CaOAl_2O_3 \cdot 3CaSO \cdot 31H_2O$).

Известно, что необходимый компонент «бациллы» — гидроалюминаты кальция ($3CaOAl_2O_3 \cdot 6H_2O$) — образуется при твердении глиноземистого цемента. Поэтому расширяющиеся и безусадочные цементы в своем составе обязательно содержат глиноземистый цемент. Другим «стандартным» компонентом является двуводный гипс. Остальные компоненты состава расширяющегося цемента могут быть представлены портландцементным клинкером или другими активными минеральными добавками. Название расширяющегося цемента зависит от его состава (табл. 4.7):

- гипсоглиноземистый цемент;
- быстросхватывающийся расширяющийся портландцемент;
- водонепроницаемый расширяющийся цемент (ВРЦ);
- напрягающий цемент.

Таблица 4.7

Виды расширяющегося цемента и их параметры

Цемент	Состав		Линейное расширение	Прочность, МПа
	Основные компоненты	Специальные компоненты		
Гипсоглиноземистый расширяющийся цемент	Глиноземистый цемент 70 %, двуводный гипс 30 %	—	1 сут. — 0,15 %; 28 сут. — 0,3...1 %	$R_{3\ сут.}$ 40 50
Быстросхватывающийся расширяющийся портландцемент	Портландцементный клинкер 69...75 %, полуводный гипс 9...11 %	Сульфоалюминатный продукт 16...20 %	—	—
Водонепроницаемый расширяющийся цемент	Цементный клинкер 60...65 %, двуводный гипс 7...10 %, активная минеральная добавка 20...25 %	Высокоглиноземистые доменные шлаки 5...7 %	1 сут. — 0,15 %; 28 сут. — 0,3...1 %	$R_{28\ сут.}$ 40 50
Напрягающий цемент	Портландцемент 65...75 %, двуводный гипс 10...16 %	Глиноземистый цемент 13...20 %	До 4 %	$R_{28\ сут.}$ 40...50

Наибольшее применение нашли гипсоглиноземистый расширяющийся цемент, расширяющийся портландцемент и напрягающий цемент.

Гипсоглиноземистый расширяющийся цемент — быстродействующее гидравлическое вяжущее вещество, получаемое совместным тонким помолом высокоглиноземистых доменных шлаков (70 %) и природного двуводного гипса (30 %) или тщательным смешиванием тех же материалов, измельченных раздельно.

Начало схватывания должно наступать не ранее 20 мин, конец — не позднее 4 ч от начала затворения.

Гипсоглиноземистый цемент расширяется только при твердении в воде; при твердении на воздухе он является безусадочным.

Предел прочности при сжатии через 1 сут. твердения должен быть 35 МПа (марка 400) и 50 МПа (для марки 500). Марки цемента соответствуют трехдневному возрасту.

Данный цемент применяют для получения безусадочных и расширяющихся водонепроницаемых бетонов, для гидроизоляционных штукатурных работ, для укрепления скважин и др.

Расширяющийся портландцемент — быстротвердеющее гидравлическое вяжущее вещество, получаемое совместным тонким помолом портландцементного клинкера, высокоглиноземистого шлака, двуводного гипса и доменного гранулированного шлака.

Цементный камень на расширяющемся портландцементе в начальный период твердения увеличивается в объеме на 0,3...1,2 %, в связи с чем бетоны и растворы на этом вяжущем обладают большей водопроницаемостью по сравнению с бетонами на обычном цементе.

Бетоны на таком цементе позволяют сокращать сроки их пропаривания для получения проектной отпускной прочности.

Расширяющийся портландцемент применяют при изготовления бетонов и растворов для заделки стыков и омоноличивания железобетонных конструкций.

Напрягающий цемент (НЦ) — быстросхватывающееся и быстротвердеющее гидравлическое вяжущее вещество, получаемое совместным помолом портландцементного клинкера (65...70 %), двуводного гипса (8...15 %) и высокоглиноземистого компонента (10...20 %). Тонкость помола не менее 4000 $см^2/г$. Срок начала схватывания — не ранее 30 мин, конца схватывания — не позднее 4 ч. Характеризуется повышенными показателями водо- и газонепроницаемости, морозостойкости, прочности на растяжение и изгиб. Обладает способностью к значительному расширению (до 3,5...4 %) при твердении. Марки цемента 400 и 500.

В железобетоне НЦ создает после отвердевания предварительное напряжение арматуры, что используется при изготовлении предварительно напряженных железобетонных конструкций. Этот вид цемента используют также для гидроизоляции шахт, подвалов, зачеканки швов, для строительства дорожных и аэродромных цементобетонных покрытий.

4.11. Транспортировка и хранение цементов

Цементы транспортируют с помощью автомобильного и железнодорожного транспорта. По железной дороге цемент доставляют в крытых вагонах (навалом или в бумажных мешках) или в специальных цистернах, контейнерах, бункерах. Выгрузку осуществляют пневмосредствами или механическими разгрузчиками.

При перевозке автоцементовозами загрузку осуществляют через герметически закрывающийся люк, а выгрузку — с помощью сжатого воздуха (компрессор имеется на цементовозе).

Цементы разных заводов (поступающие навалом) хранят отдельно в силосных или бункерных складах (рис. 4.20).

На каждую емкость ставят указатели, где отмечают вид цемента, его марку, время прибытия и количество.

При необходимости контроля качества цемента от каждой партии отбирают пробу 20 кг и направляют в строительную лабораторию.

При длительном хранении цемент комкуется и теряет активность, поэтому хранить большие его запасы нежелательно.

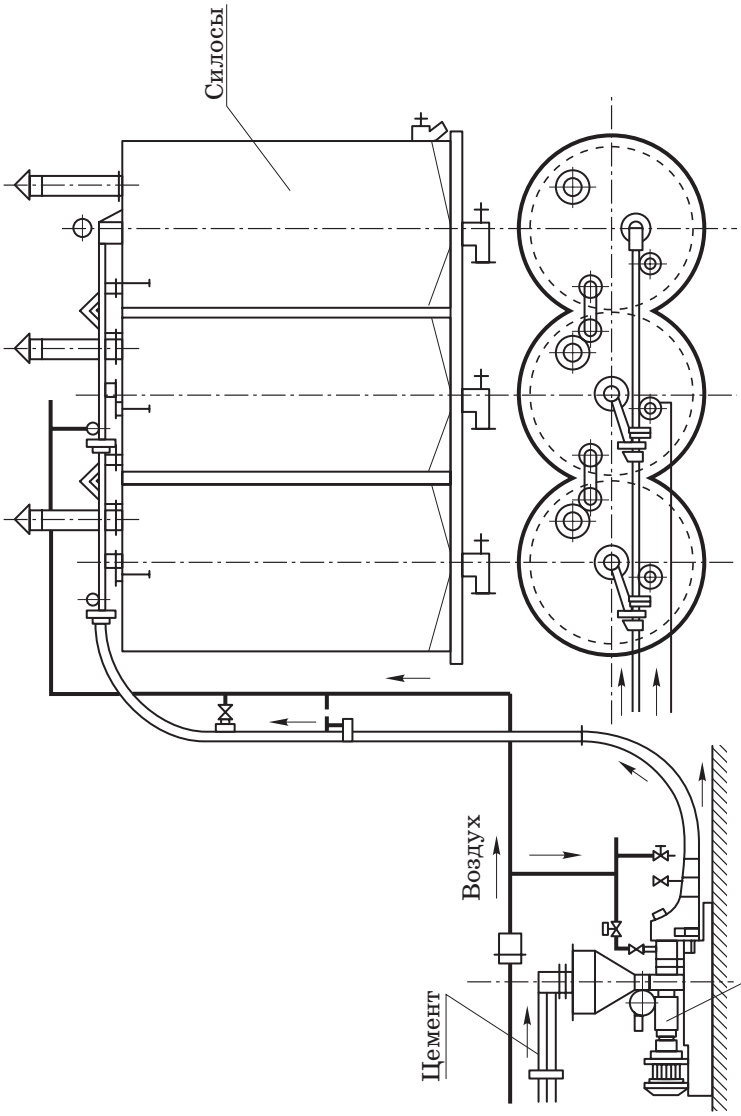


Рис. 4.20. Хранение цемента в силосах

Вопросы и задания для самопроверки

1. Как получают воздушную строительную известь и какие ее виды существуют?

2. Как изготовляют строительный гипс? Какими свойствами он обладает и где его используют? Чем от него отличается эстрих-гипс?

3. Что такое жидкое стекло, кислотоупорный цемент и в чем сущность их твердения?

4. В чем отличие гидравлических вяжущих веществ от воздушных? Назовите примеры вяжущих обеих групп.

5. Какими способами изготавливают портландцемент? Что служит сырьем?

6. Какие минералы преобладают в структуре цементного клинкера?

7. С какой целью добавляют гипс при помоле цементного клинкера?

8. В чем сущность процесса твердения минеральных вяжущих веществ?

9. Что такое марка цемента, как ее определяют?

10. Какие факторы внешней среды влияют на прочность твердеющего цемента? Благодаря чему прочность цемента со временем увеличивается?

11. Назовите виды коррозии цементного камня; объясните, чем они обусловлены.

12. Назовите, в каких случаях нецелесообразно использовать быстротвердеющий цемент (БТЦ) и когда его применение не допускается.

13. Как получают белый и цветной портландцементы? Назовите области их применения.

14. Чем гидрофобный портландцемент отличается от обычного?

15. Назовите активные минеральные добавки к цементам. В чем заключается их активность?

16. Для чего используют минеральные добавки-наполнители?

17. Что такое пуццолановый портландцемент? Какова область его применения?

18. Как получают шлакопортландцемент? Назовите его свойства и область применения.

19. Почему шлаки для изготовления шлакопортландцемента должны быть гранулированными?

20. Каковы особенности глиноземистого и расширяющихся цементов?

5 БЕТОНЫ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ИЗДЕЛИЯ

5.1. Общие положения

В XXI в. бетон по-прежнему остается одним из наиболее перспективных строительных материалов. Например, во многих странах мира применение бетона в 10 раз превосходит использование строительных сталей. Почему бетон так широко применяется в промышленном, жилищно-коммунальном, дорожном, гидротехническом и аэродромном строительстве? Для ответа на этот вопрос можно выделить следующие главные причины:

1) бетон — универсальный строительный материал;

2) существует возможность рационального объединения в одном конструктивном решении бетона и стали, взаимно дополняющих друг друга (такой композитный материал традиционно обозначают термином «железобетон»);

3) применение бетона позволяет создавать различные архитектурно-строительные конструкции и формы;

4) применение бетона позволяет круглогодично возводить инженерные сооружения в сборном или монолитном виде при относительно невысокой стоимости;

5) бетон по сравнению с деревом и большинством сталей обладает стойкостью по отношению к воздействию воды.

Бетон (на известковом вяжущем) известен с глубокой древности. Наиболее раннее его применение, обнаруженное археологами, относится к 5600 г. до н.э. Однако бетон тех времен мало походил на современный. В современном виде бетон начали применять лишь в XIX в., когда был изобретен цемент.

Широкое применение бетона в строительстве объясняется исключительной простотой его состава — в него входят це-

мент, вода, мелкий (песок) и крупный (щебень или гравий) заполнители. Вода химически взаимодействует с цементом, в результате чего их вязкопластичная смесь постепенно твердеет с образованием прочного цементного камня, который связывает заполнители в единую систему (монолит). При необходимости в состав бетона вводят добавки различного назначения.

Современное определение бетона следующее.

Бетон — искусственный каменный материал, получаемый в результате затвердевания правильно подобранной, тщательно перемешанной и уплотненной смеси неорганического вяжущего вещества, воды, заполнителей и, в некоторых случаях, специальных добавок. До затвердевания эта смесь называется *бетонной смесью*.

Экономичность состава бетона, на объем которого приходится до 80...90 % заполнителей из местных материалов, достигается возможностью использования крупнотоннажных отходов промышленности.

5.2. Классификация бетонов

Классифицируют бетоны по следующим основным признакам.

По назначению различают бетоны конструкционные и специальные.

Конструкционные бетоны — это бетоны несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений. Требования к таким бетонам сформулированы в виде ряда физико-механических характеристик. Конструкционные бетоны делят на обычные, гидротехнические, дорожные и др.

Обычным (*общестроительным*) называют бетон, к которому не предъявляются особые требования, связанные со спецификой его работы в конструкциях или изделиях.

К *гидротехническим* относят бетоны, применяемые для возведения гидротехнических сооружений (плотин, шлюзов, каналов, водорегулирующих сооружений).

Дорожным называют бетон, применяемый в покрытиях и основаниях автомобильных дорог и аэродромов.

К ***специальным*** бетонам относятся жаростойкие, конструкционно-теплоизоляционные и коррозионно-стойкие.

Жаростойкие бетоны применяют для изготовления конструкций, которые в условиях эксплуатации подвергаются постоянному или периодическому воздействию высоких температур (200...1800 °С).

Конструкционно-теплоизоляционные предназначены для железобетонных конструкций, к которым предъявляются требования как по несущей способности, так и по теплоизоляционным свойствам.

Коррозионно-стойкими называют бетоны, способные в условиях эксплуатации противостоять действию агрессивных сред.

По средней плотности различают особо тяжелые, тяжелые, легкие и особо легкие бетоны.

Особо тяжелые бетоны — бетоны со средней плотностью более 2500 кг/м^3. Изготовляют на особо тяжелых заполнителях (магнетит, лимонит, барит, чугунная дробь, обрезки стали). Такие бетоны применяют для специальных конструкций (например, при строительстве атомных электростанций или для защиты от радиоактивного излучения).

Тяжелые бетоны — бетоны со средней плотностью от 2000 до 2500 кг/м^3. Изготовляют на песке и крупном заполнителе из плотных горных пород. Такой бетон широко применяют во всех несущих конструкциях.

Легкие бетоны — бетоны со средней плотностью от 500 до 2000 кг/м^3. Изготовляют на пористом крупном заполнителе и пористом или плотном мелком песке. Используют в основном для производства ограждающих конструкций.

Особо легкие бетоны (*ячеистые*) со средней плотностью менее 500 кг/м^3. Изготовляют с применением порообразователей. Используются в качестве теплоизоляционного материала (плиты, скорлупы, стеновые изделия — мелкие блоки и панели).

По виду вяжущего бетоны подразделяют:

- на цементных вяжущих;

- на известковых вяжущих;
- на гипсовых вяжущих;
- на жидком стекле;
- на шлако-щелочном вяжущем.

По виду заполнителей различают:

- бетоны на плотных заполнителях (с объемным водопоглощением зерен менее 6 %);
- бетоны на пористых заполнителях (с объемным водопоглощением зерен более 6 %);
- бетоны на специальных заполнителях, удовлетворяющих специальным требованиям (например, по жаростойкости, химической стойкости и т.д.).

По крупности зерен заполнителей различают бетоны крупнозернистые и мелкозернистые. Мелкозернистым считается бетон, в котором размеры зерен крупного заполнителя не превышают 10 мм.

В зависимости от вида структуры бетоны делятся на плотные, крупнопористые, поризованные и ячеистые.

Плотными называют бетоны, в которых степень заполнения объема пустот между зернами заполнителей составляет не менее 95 %.

Крупнопористые — бетоны, у которых значительная часть объема межзерновых пустот остается не занятой мелким заполнителем и затвердевшим вяжущим веществом (беспесчаные и мелкопесчаные бетоны).

Поризованными называют бетоны, у которых пространство между зернами заполнителей занято затвердевшим веществом (цементным камнем) повышенной пористости вследствие введения в бетонную смесь пено- и газообразователей или воздухововлекающих добавок.

Ячеистыми бетонами называют высокопористые бетоны, не содержащие крупного заполнителя, с равномерно распределенными искусственно созданными порами в виде ячеек диаметром 1...2 мм.

По условиям твердения бетоны подразделяются:

- на бетоны естественного твердения, твердеющие при температуре 15...20 °С и атмосферном давлении;

- бетоны, подвергаемые тепловой обработке (70…90 °С) при атмосферном давлении;
- бетоны, твердеющие в автоклавах при температуре 175…200 °С и давлении пара 0,9…1,6 МПа.

5.3. Материалы для бетонов

Вид бетона и требования к его свойствам регламентируются нормативными документами в зависимости от условий будущей эксплуатации изделий и конструкций.

Общими требованиями для получения качественных бетонов являются:

- правильное проектирование состава бетона;
- правильное приготовление, укладка и уплотнение бетонной смеси;
- правильный уход за уложенным бетоном в начальный период твердения.

Первым шагом к получению качественного бетона является правильный выбор исходных материалов для его приготовления.

5.3.1. Вяжущие вещества

В бетонах в качестве вяжущих наиболее широко применяются различные цементы. При этом определяющим фактором при выборе вида цемента являются условия эксплуатации конструкции.

Так, например, при производстве бетонных конструкций, работающих в условиях воздушно-сухой среды, используют *портландцементы с повышенным содержанием алита* ($3CaO \cdot SiO_2$).

В случае, если конструкция должна обладать устойчивостью к агрессивному воздействию среды, предпочтение отдают *пуццолановому цементу* или *шлакопортландцементу*.

Если требуется произвести быстрый монтаж фундаментов под машины, выполнить аварийные работы, скоростное стро-

ительство, зимнее бетонирование, используют *глиноземистый цемент*.

Цементы, имеющие величину активности выше значения требуемой прочности бетона (раствора) в два раза и более, в неагрессивной среде должны применяться с тонкомолотыми активными минеральными добавками или микронаполнителями, снижающими активность цемента, но увеличивающими общее количество вяжущего. Оптимальное содержание добавок устанавливается на основании лабораторных испытаний.

В соответствии с «Типовыми нормами расхода цемента для приготовления бетонов сборных и монолитных бетонных, железобетонных изделий и конструкций» (СНиП 5.01.23–83), марка цемента выбирается в зависимости от средней прочности бетона при сжатии и условий его твердения по табл. 5.1.

Таблица 5.1

Рекомендуемые и допустимые марки цемента для тяжелых бетонов на крупном заполнителе

Проектная марка бетона	Марка цемента при твердении в условиях					
	естественных		тепловой обработки при отпускной прочности бетона			
			7 % проектной и менее		80…100 % проектной	
	рекомендуемая	допустимая	рекомендуемая	допустимая	рекомендуемая	допустимая
М100	300	—	300	—	—	—
М150	300	400	300	400	400	300, 500
М200	400	300, 500	400	300, 500	400	500
М250	400	300, 500	400	300, 500	400	500
М300	400	500	400	500	500	400
М350	400	500	400	500	500	400
М400	500	550, 600	500	550, 600	550	500, 600
М450	550	500, 600	550	500, 600	600	500, 550
М500	600	550, 500	600	550, 500	600	550
М600	600	550	600	550	—	—

Для мелкозернистых бетонов марку цемента рекомендуется выбирать по табл. 5.2.

Таблица 5.2

Рекомендуемые и допустимые марки цемента для мелкозернистых бетонов

Проектная марка бетона	Марка цемента	
	рекомендуемая	допустимая
М100	300	400
М150	400	500
М200	400	500
М250	500	400
М300	500	400
М350	500	400
М400	500	—

Для неармированных бетонных конструкций минимальный расход цемента должен составлять не менее 170 кг на 1 м^3 бетона, для железобетонных конструкций — не менее 220 кг. Максимальный расход цемента в бетоне не должен превышать 600 кг/м^3.

Выбор марки цемента зависит также от требуемой прочности бетона в конструкциях. Обычно исходят из условия, что марка цемента по прочности ($R_ц$) должна превышать на 10…40 % марку бетона ($R_б$):

$$R_ц = (1{,}1…1{,}4)R_б. \qquad (5.1)$$

При этом при низких марках бетона (100…300) превышение марки цемента достигает 200 %.

5.3.2. Вода для затворения бетонных смесей

Вода для затворения бетонных смесей не должна содержать вредных примесей, препятствующих нормальному схватыванию и твердению цемента.

Без какой-либо предварительной проверки для затворения бетонных смесей применяется питьевая вода. Запрещается использовать болотные и сточные воды, а также воды, загрязненные маслами, содержащие свободные кислоты. Допускается применять для затворения воду с pH не менее 4 и не более 12,5, т.е. слабокислую или слабощелочную.

Вода считается пригодной, если приготовленные на ней образцы бетона имеют прочность не ниже, чем у контрольных образцов на чистой пресной воде.

5.3.3. Заполнители

Заполнители — природные или искусственные минеральные материалы определенного зернового состава, которые в рационально составленной смеси с вяжущим образуют бетон или раствор. Доля заполнителей в объеме бетона составляет 80…90 %.

Стоимость заполнителей достигает 30…50 % стоимости бетонных и железобетонных конструкций.

Положительная роль заполнителей заключается в том, что они позволяют:

- уменьшить расход вяжущего;
- снизить усадку цементных бетонов;
- увеличить прочность и модуль упругости бетона (при применении высокопрочных заполнителей);
- придать бетону требуемые специальные свойства (жаростойкость, радиационная стойкость и др.).

В соответствии с нормативными документами заполнители классифицируют по происхождению, крупности зерен, форме зерен и плотности.

Щебень (гравий) обеспечивает в бетоне формирование макроструктуры, определяемой физико-механическими свойствами горной породы, из которой получен, крупностью и формой зерен, зерновым составом и количественным содержанием в бетоне.

В качестве крупного заполнителя в бетоне может быть применен щебень, полученный дроблением природного камня или отходов горнообогатительных предприятий, а также гравий.

При выборе крупного заполнителя требования к нему в зависимости от вида принимают в соответствии со значениями показателей, установленных существующими нормативными документами.

Качество крупного заполнителя (щебня, гравия) определяют:

- зерновой состав;
- пустотность;
- форма зерен;
- прочность зерен;
- водопоглощение;
- содержание пылевидных и глинистых частиц;
- содержание зерен слабых пород;
- морозостойкость;
- петрографическая характеристика;
- истинная, средняя и насыпная плотность;
- пористость.

Зерновой состав характеризуется процентным содержанием различных фракций, которые в зависимости от наибольшей крупности зерен могут быть следующие (мм): 5…10 (3…10); 10…20; 20…40; 40…70; 70…120. Содержание различных фракций в крупном заполнителе (щебень, гравий) при подборе состава бетона должно соответствовать указанному в табл. 5.3 и обеспечивать получение плотной смеси.

Таблица 5.3

Рекомендуемый зерновой состав щебня для плотных смесей

Наибольшая крупность заполнителя, мм	Содержание фракций, мм, в крупном заполнителе, %				
	От 5 до 10	Свыше 10 до 20	Свыше 20 до 40	Свыше 40 до 70	Свыше 70 до 120
20	25…40	60…75	—	—	—
40	15…25	20…35	40…65	—	—
70	10…20	15…25	20…35	35…55	—
120	5…10	10…20	15…25	20…30	30…40

От зернового состава зависит *пустотность* щебня (гравия), определяющая расход цемента в бетоне. Пустотность щебня (гравия) зависит также от формы зерен. С увеличением

содержания в щебне зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой форм пустотность повышается.

Форма зерен заполнителя влияет, прежде всего, на удобоукладываемость бетонной смеси. Пластинчатые (лещадные) зерна заполнителя укладываются в строго ориентированном, горизонтальном положении. Это делает структуру бетона неоднородной, а его свойства неодинаковыми (анизотропными) в разных направлениях. Поэтому содержание зерен лещадной формы ограничивается стандартами.

В зависимости от содержания в щебне зерен пластинчатой и игловатой форм щебень подразделяют на три группы: кубовидный (до 15 %), улучшенный (15...25 %), обычный (25...35 %).

Для создания плотных смесей с хорошими технологическими свойствами применяют разнозернистый щебень (см. табл. 5.3), пустотность которого не более 45 %, содержание зерен пластинчатой и игловатой форм не более 35 % (в щебне для дорожного бетона — 25 %). Предельная крупность щебня (гравия) должна составлять не более 1/4 минимального сечения элемента конструкции и не более наименьшего расстояния между стержнями арматуры. Для бетонирования плит, полов и покрытий допускают наибольшую крупность щебня до 1/2 толщины плиты. Для массивных элементов сооружений можно применять и очень крупный щебень. В бетонах специального назначения (например, высокопрочных, дорожных и аэродромных) наибольшая крупность щебня составляет 40, 20 мм и в отдельных случаях 10 мм. Это улучшает физические свойства бетона и увеличивает его прочность при изгибе и растяжении.

При взаимодействии цементного теста с поверхностью щебня протекают физико-химические процессы, которые обусловливают прочность сцепления (адгезию) цементного камня со щебнем, а следовательно, определяют прочность бетона, особенно при растяжении. Высокое сцепление обеспечивает свежедробленый чистый щебень из известняков и металлургических шлаков. Повышение шероховатости, уменьшение количества смятых участков на поверхности зерен также способствует увеличению сцепления цементного камня со щебнем.

Прочность щебня должна быть примерно в два раза больше прочности бетона марки 300 и выше, при этом *водопоглощение* щебня не должно быть более 3 %. Если бетон не будет подвержен замерзанию, водопоглощение щебня может доходить до 5 %. Для бетонов марки 300 и ниже прочность щебня должна быть больше марки в 1,5 раза. Для специальных бетонов (дорожного, аэродромного и др.), работающих в конструкциях на изгиб и растяжение, следует определять прочность щебня на растяжение, которая должна быть в 1,5–2 раза выше, чем у бетона (меньшее значение для щебня из известняков и песчаников, большее — для щебня из изверженных пород).

В щебне ограничивается *содержание пылевато-глинистых частиц* (до 1 %), а также вредных примесей в виде сернистых и сернокислых соединений, корродирующих цементный камень, и органических соединений, которые при повышенном содержании разрушают бетон.

Качество гравия как макроструктурной составляющей бетона определяется *петрографическим составом*, крупностью, зерновым составом, формой и степенью окатанности зерен, количеством и качеством примесей, а также физико-механическими свойствами.

Требования к гравию по крупности и зерновому составу, водопоглощению и морозостойкости те же, что и к щебню.

Лучшими разновидностями гравия являются те, которые состоят из зерен округлой, игловатой форм со слабоокатанной (шероховатой) поверхностью. Плоские окатанные зерна следует дробить. Марка гравия и щебня из гравия (см. табл. 3.3) должна быть не ниже Др. 8 — для бетона класса В30 (М400) и выше; Др. 12 — для бетона классов В25 (М350) и Др. 16 — для бетона класса В22,5 (М300).

В гравии допускается содержание *слабых зерен* не более 10 % по массе.

Марка щебня, гравия и щебня из гравия для бетона покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов должна быть не менее указанной в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Марка крупного заполнителя по прочности бетона для дорожных покрытий и оснований, МПа

Назначение бетона	Щебень		Гравий и щебень из гравия (см. табл. 3.3)
	из изверженных и метаморфических пород	из осадочных пород	
Однослойные покрытия и верхний слой двухслойных покрытий	120	80	Др. 8
Нижний слой двухслойных покрытий	80	60	Др. 12
Основания капитальных покрытий	80	30	Др. 16

Прочность бетона с гравием обычно на 10…15 % ниже (при очень гладкой поверхности зерен — на 30 %), чем бетона со щебнем (при равном водоцементном отношении). Поэтому, если по технико-экономическим соображениям это целесообразно, следует дробить гравий на щебень. Примесь дробленого гравия около 35 % заметно улучшает его качество.

Сернистых и сернокислых примесей в гравии не должно быть более 1 % в пересчете на SO_3, пылевато-глинистых — 1 % (по массе), органических веществ — следовых количеств (не более эталона по колориметрической пробе).

Поскольку в месторождениях природный гравий, как правило, загрязнен пылевато-глинистыми примесями, его следует промывать в гравиемойках, а затем фракционировать. Гравий из разнопрочных зерен подвергают сепарации на классификаторах.

Средняя плотность бетона зависит от вида заполнителей табл. 5.5.

Песок. Для бетона применяют пески крупные, средние и мелкие, природные, дробленые, а также пески, обогащенные и фракционированные, отвечающие требованиям ГОСТ 8736–93.

Таблица 5.5

Средняя плотность бетона на разных заполнителях

Заполнитель	Средняя плотность бетона, кг/м^3
Стальные опилки, барит	2600 и выше
Щебень или гравий из плотных горных пород (гранит, сиенит, диабаз)	2200...2600
Кирпичный щебень	1800...2200
Топливные котельные шлаки	1400...1800
Пемза, туф	1000...1400
Керамзит	800...1000

Выбор песка для бетона производят:

- по зерновому составу и модулю крупности;
- содержанию пылевидных и глинистых частиц;
- петрографическому составу.

При применении дробленых песков их качество характеризуют по *пределу прочности исходной горной породы* при сжатии в насыщенном водой состоянии. Лучшими по качеству являются кварцевые пески, их чаще применяют для изготовления бетонов и растворов.

Зерновой (*гранулометрический*) *состав* песка характеризуется содержанием в нем зерен различной крупности и определяется путем просеивания средней пробы сухого песка через набор стандартных сит (размер ячеек 5; 2,5; 1,25; 0,63; 0,315 и 0,16 мм). По результатам просеивания вычисляют модуль крупности $М_к$ (см. п. 3.6.3.). По ГОСТ 8736–93 предусмотрено деление песка на группы по модулю крупности и полному остатку на сите № 0,63 (табл. 5.6).

Таблица 5.6

Классификация песков по крупности

Группа песка	Модуль крупности $М_к$	Полный остаток на сите № 063, % по массе
Очень крупный	Свыше 3,5	Свыше 75
Повышенной крупности	3,0...3,5	65...75
Крупный	2,5...3,0	45...65
Средний	2,0...2,5	30...45

Окончание табл. 5.6

Группа песка	Модуль крупности $М_к$	Полный остаток на сите № 063, % по массе
Мелкий	1,5...2,0	10...30
Очень мелкий	1,0...1,5	До 10
Тонкий	0,7...1,0	Не нормируется
Очень тонкий	До 0,7	Не нормируется

Чем больше в песке мелких зерен, тем больше его удельная поверхность. Для соединения зерен песка в бетоне необходимо, чтобы цементное тесто покрывало всю поверхность каждой песчинки. Таким образом, расход цемента будет возрастать с увеличением удельной поверхности песка, т.е. с увеличением содержания в нем количества мелких фракций. Именно поэтому не рекомендуется использовать для бетонов песок с $М_к < 2$ во избежание перерасхода вяжущего.

По результатам определения зернового состава строится кривая, которая сравнивается с установленным требованиями ГОСТом графиком зернового состава песка (рис. 5.1). Если

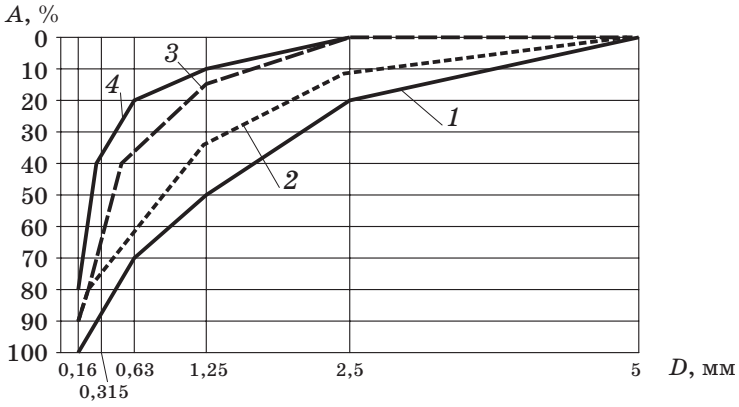


Рис. 5.1. Зерновой состав песка:
1 — допускаемая нижняя граница крупности песка ($М_к = 1,5$); *2* — рекомендуемая нижняя граница крупности песка ($М_к = 2,0$) для бетона класса В15 и выше; *3* — рекомендуемая нижняя граница крупности песка ($М_к = 2,5$) для бетонов класса В25 и выше; *4* — допускаемая верхняя граница крупности песка ($М_к = 3,25$) для растворов и бетонов

кривая просеивания не выходит за допустимые границы, песок признается пригодным для использования в бетоне.

При несоответствии зернового состава природных песков установленным требованиям, в мелкий песок добавляют природный или дробленый песок крупных фракций, а в крупный песок (для понижения модуля крупности) — мелкие пески.

При оптимальном зерновом составе *пустотность* песка не превышает 38 %. Косвенной характеристикой пустотности песка служит его насыпная плотность, которая у сухого кварцевого песка в рыхлом состоянии колеблется в пределах 1500...1550 кг/м^3, а в уплотненном встряхиванием состоянии — в пределах 1600...1700 кг/м^3.

Содержание воды в песке существенно влияет на его свойства. Если для других строительных материалов увлажнение, как правило, приводит к увеличению их плотности, то для песка ситуация обстоит иначе. Самый большой объем песок занимает при 4...7 % влажности (по массе). Это связано с тем, что влажный песок не столь сыпуч, как сухой, так как каждая песчинка покрывается тонким слоем воды. При таком значении влажности насыпная плотность песка уменьшается и общий объем песка возрастает (рис. 5.2). При дальнейшем увеличении влажности (порядка 20 %) вода входит в межзерновые пустоты песка, вытесняя воздух, и насыпная плотность песка снова увеличивается.

Изменение объема свободно засыпанного песка в зависимости от его влажности необходимо учитывать при дозировке песка для бетонной смеси и в других случаях, когда приме-

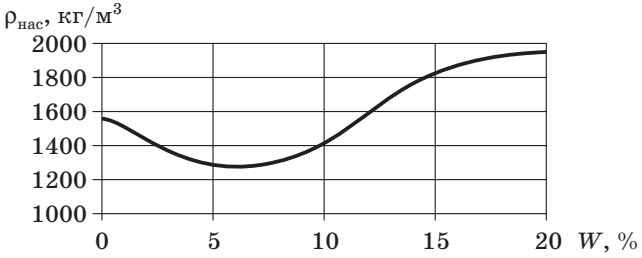


Рис. 5.2. Изменение насыпной плотности песка при изменении его влажности

няется влажный песок (в частности, при его добыче или обогащении гидроспособом).

Присутствие в песке *пылеватых* и особенно *глинистых примесей* снижает прочность и морозостойкость бетонов. Количество таких примесей определяют отмучиванием (многократной промывкой водой). Загрязняющие примеси ухудшают качество сцепления зерен заполнителя с вяжущим, уменьшают прочность и однородность изготавливаемых изделий. Для улучшения качества заполнителей применяется их промывка водой или обработка сухими способами — с помощью плоских вибрационных или барабанных грохотов, а также пульсирующих обеспыливателей.

Присутствие в песке *органических примесей* (остатков растений, органических кислот) замедляет схватывание и твердение цемента и снижает прочность бетона. Для оценки количества органических примесей пробу песка по ГОСТ 8735–88 обрабатывают раствором едкого натра и сравнивают цвет раствора с эталоном. Если цвет темнее эталона, песок нельзя использовать в качестве заполнителя без дополнительных исследований.

Для технологии бетонов важным является такая характеристика песка, как его *водопотребность* — способность удерживать определенное количество воды на поверхности зерен в межзерновых пустотах. Водопотребность песка колеблется в пределах 4…6 % для крупнозернистых песков, 3…6 % для песков средней крупности, 8…10 % для мелкозернистых песков и более 10 % для очень мелких песков.

Использование местных мелкозернистых песков с повышенной удельной площадью поверхности и пустотностью обычно вызывает большой расход цемента. Прогрессивная технология производства бетонных смесей (введение пластифицирующих добавок, принудительное перемешивание и виброуплотнение) эффективно повышает использование местных мелкозернистых песков.

5.3.4. Добавки

Для придания бетонным смесям и бетонам специальных свойств, а также для экономии цемента применяют различные добавки, классифицируемые в зависимости от основного эффекта действия (табл. 5.7).

Таблица 5.7

Классификация добавок в бетоны

Классификационный признак	Добавки
Регуляция свойств готовых смесей	Пластифицирующие (суперпластифицирующие, сильнопластифицирующие, пластифицирующие); стабилизирующие, регулирующие подвижность, поризующие (воздухововлекающие, пенообразующие, газообразующие)
Изменение свойств бетона	Регулирующие кинетику твердения (ускорители, замедлители); повышающие прочность; снижающие проницаемость; повышающие защитные свойства по отношению к стальной арматуре; повышающие морозостойкость; повышающие коррозионную способность; повышающие сульфатостойкость; повышающие стойкость против коррозии, вызванной реакцией кремнезема заполнителей со щелочами цемента и добавок; регулирующие процесы усадки и расширения
Придание бетонам специальных свойств	Противоморозные; гидрофобизирующие; биоцидные; повышающие стойкость к высолообразованию

По виду материала все добавки подразделяют на два вида:

- химические;
- тонкодисперсные минеральные добавки.

Химические добавки вводятся в состав бетона в малом количестве (0,1…2 % от массы цемента). Такие добавки влияют:

- на регулирование структуры бетона;
- удобоукладываемость смеси;
- скорость и сроки твердения бетона;
- морозостойкость;
- коррозионную стойкость;
- пористость.

Применение химических добавок по ГОСТ 24211–2008 является одним из наиболее универсальных, широко доступных

и оперативных способов управления технологией бетона и регулирования его свойств.

К химическим добавкам относят: *поверхностно-активные вещества* (гидрофильные, гидрофобные, воздухововлекающие), *электролиты* (одни из них ускоряют растворение минералов цемента, другие взаимодействуют с минералами цемента, образуя водонерастворимые вещества, третьи понижают температуру замерзания воды затворения).

Наиболее типичными сильно пластифицирующими смесь добавками являются *лигносульфонаты* (*ЛСТ*) — отходы целлюлозно-бумажных комбинатов. Это поверхностно-активное вещество вводится в смесь в количестве 0,15...0,3 % от массы цемента, что пластифицирует ее, снижает водопотребность и позволяет сократить расход цемента на 5...7 % или снизить водоцементное отношение и увеличить прочность бетона на 10...12 %.

В последнее время получили распространение химические добавки в виде *суперпластификаторов* — синтетических полимерных веществ, которые резко увеличивают подвижность и текучесть бетонной смеси и существенно улучшают строительно-технические свойства бетона. Суперпластификаторы вводят в бетонную смесь в количестве 0,1...1,2 % от массы цемента. Они разжижают бетонную смесь в большей степени, чем обычные пластификаторы, например, увеличивают подвижность смеси с 2 до 20 см по осадке конуса или на 20...25 % снижают водопотребность бетонной смеси. Использование их позволяет:

- применять бетоны с низким водоцементным отношением (В/Ц), что дает возможность получать высокую прочность бетона проще, чем при использовании других технологических приемов;
- шире использовать литьевой способ приготовления сборного железобетона;
- бетонировать конструкции сложного профиля;
- сокращать время формования изделий;
- повышать качество лицевых поверхностей;
- уменьшать расход цемента.

Среди суперпластификаторов широко применяют добавку С-3 на основе нафталинсульфокислоты.

Химические добавки для регулирования структуры делятся на воздухововлекающие, газообразующие, уплотняющие, расширяющиеся и др.

Из *воздухововлекающих* наибольшее распространение получила «смола нейтрализованная воздухововлекающая» (СНВ) — абиетиновая смола, омыленная каустической содой. Вводят ее в количестве 0,01...0,03 % от массы цемента, что способствует вовлечению в смесь до 4...5 % воздуха в виде мелких пузырьков, что заметно увеличивает морозостойкость бетона.

С этой же целью широко применяют химические добавки в виде кремнийорганических жидкостей (ГКЖ-10, ГКЖ-11), представляющие собой водно-спиртовые растворы этилметилсиликоната натрия. При введении их в смесь (0,01...0,02 % от массы цемента) образуются мелкие пузырьки газа, что способствует повышению морозостойкости бетона.

В ряде случаев вводят добавки, *уменьшающие коррозию арматуры* в железобетоне: нитрит натрия, бихроматы натрия и калия.

Некоторые химические добавки обладают полифункциональным действием (например, одновременно пластифицирующие и воздухововлекающие, противоморозные и ингибирующие коррозию арматуры и др.).

Номенклатура рекомендуемых к применению в бетонах химических добавок приведена в табл. 5.8.

Таким образом, применяя химические добавки, можно эффективно в широких пределах управлять свойствами бетонной смеси и бетонов, поэтому современная технология производства бетонных изделий немыслима без их использования.

Однако следует помнить, что многие из применяемых химических добавок могут оказывать вредное влияние на работающих. Например, нитрат кальция (НК) и нитрит-нитрат кальция (ННК) поражают открытые участки кожи. Для защиты от этого необходимо применять резиновые перчатки или мази. Рабочие, занятые приготовлением растворов добавок, должны пользоваться индивидуальными средствами защиты. Лицам, не достигшим 18 лет, работать с химическими веществами не разрешается.

Таблица 5.8

Рекомендуемые химические добавки в бетоны

Класс добавок по ГОСТ 24211–2008	Наименование	Условное обозначение	Рекомендуемая дозировка*	Эффект применения
Суперпластификаторы	Разжижитель С-3 Разжижитель СМФ, дофен	С-3 СМФ, ДФ	0,5...1,0 0,5...1,5	Снижение водопотребности бетонной смеси более 20 %, увеличение подвижности от П1 до П5 без снижения прочности
Сильнопластифицирующие	Лигносульфонат технический, модифицированный лигносульфонат	ЛСТМ-2, МТС-1	0,15...0,25	Снижение водопотребности бетонной смеси до 20 %, увеличение подвижности от П1 до П4 без снижения прочности
Слабопластифицирующие	Нейтрализованный черный контакт, этилсиликонат натрия, метилсиликонат натрия	НЧК, ГКЖ-10, ГКЖ-11	0,05...0,2	Снижение водопотребности бетонной смеси до 10 %, увеличение подвижности от П1 до П2 без снижения прочности
Газообразующие	Полигидросилоксаны	1364, 136-157М	До 0,1	Повышение морозостойкости бетона на 200...300 циклов
Воздухововлекающие	Смола нейтрализованная воздухововлекающая, клей талловый пековый, омыленный талловый пек	СНВ, КТП, ОТП	0,005...0,03	Обеспечивает воздухововлечение в бетонную смесь 2...5 %, повышение морозостойкости в 2 раза и более

Окончание табл. 5.8

Класс добавок по ГОСТ 24211–2008	Наименование	Условное обозначение	Рекомендуемая дозировка*	Эффект применения
Противоморозные	Поташ (карбонат калия), нитрит натрия, хлорид кальция, нитрит-нитрат кальция	П, НН, ХК, ННК	До 10	Твердение бетона при отрицательных температурах
Ингибиторы коррозии	Нитрит натрия Тетраборат натрия Бихромат натрия, бихромат калия	НН ТБН БХН, БХК	2...3 0,2...3 0,5	Предотвращает коррозию арматуры в железобетоне
Регуляторы схватывания				
Ускорители схватывания и твердения	Нитрат кальция Хлорид кальция Нитрит-нитрат кальция	НК ХК ННК	1...3 0,5...2 2...3	Ускоряют схватывание и твердение, повыша-ют прочность на 20 % и более в возрасте 1 сут. нормального твердения
Замедлители	Нитрилотриметилен-фосфорная кислота Кормовая сахарная патока	НТФ КП	0,02...0,15 0,05...0,3	Замедляют схватывание до нескольких часов

* Дозировка добавки указана в % от массы цемента в пересчете на сухое вещество.

Тонкодисперсные минеральные добавки применяются в основном:

- для экономии цемента;
- получения плотного бетона при малых расходах цемента;
- повышения водостойкости бетона.

Такие добавки вводят в бетонную смесь в количестве 5…20 % от массы цемента.

Неорганические пластификаторы (известь, известьсодержащие отходы, тонкомолотые добавки — золу и цементную пыль) чаще всего используют для приготовления низкомарочных растворов, не требующих большого количества цементного вяжущего. В этом случае тонкомолотые минеральные добавки играют роль «разбавителя» высокомарочных цементов (М400 и более) при приготовлении растворов М75 и ниже.

5.4. Бетонная смесь и ее свойства

Бетонная смесь представляет собой полуфабрикат, из которого в дальнейшем изготавливают различные бетонные изделия.

5.4.1. Классификация бетонных смесей

Бетонная смесь — многокомпонентная полидисперсная смесь, получаемая путем тщательного смешивания в заданных пропорциях вяжущего, воды, добавок и заполнителей.

В бетонной смеси между дисперсными частицами существуют силы взаимодействия (силы молекулярного сцепления и вязкого трения), вследствие чего она приобретает связность и определенные свойства, характерные для структурированных вязких жидкостей.

Способность бетонной смеси деформироваться и течь под действием внешних сил определяется ее реологическими свойствами, которые оцениваются технологической характеристикой — показателем ее удобоукладываемости.

При приложении к смеси вибрационного воздействия ее первоначальная структура разрушается, уменьшается вязкость и бетонная смесь приобретает текучесть. Как только внешнее воздействие прекращается, смесь снова восстанавливает начальную прочность структуры и приходит в малоподвижное состояние.

Свойство бетонной смеси разжижаться при механическом (вибрационном) воздействии и вновь загустевать после прекращения воздействия называется ***тиксотропией***. Оно широко используется при ее укладке и уплотнении.

Удобоукладываемость смесей изменяется в широком диапазоне: от сверхжестких до литых. В зависимости от показателя удобоукладываемости бетонные смеси подразделяются на три группы (ГОСТ 7473–94):

- сверхжесткие (СЖ);
- жесткие (Ж);
- подвижные (П).

Указанные группы, в свою очередь, подразделяются на марки по удобоукладываемости (табл. 5.9).

Таблица 5.9

Классификация бетонных смесей по показателю удобоукладываемости

Группа смесей	Марка по удобоукладываемости	Норма удобоукладываемости по показателю		
		жесткости Ж, с	подвижности, см	
			осадка конуса ОК	расплыв конуса РК
Сверхжесткие	СЖ3	Более 100	—	—
	СЖ2	51...100	—	—
	СЖ1	50 и менее	—	—
Жесткие	Ж4	31...60	—	—
	Ж3	21...30	—	—
	Ж2	11...20	—	—
	Ж1	5...10	—	—
Подвижные	П1	4 и менее	1...4	—
	П2	—	5...9	—
	П3	—	10...15	—
	П4	—	16...20	26...30
	П5	—	21 и более	31 и более

5.4.2. Факторы, определяющие удобоукладываемость бетонной смеси

Расход воды — определяющий фактор удобоукладываемости. С увеличением количества воды удобоукладываемость улучшается за счет уменьшения вязкости цементного теста, а вместе с ней и бетонной смеси в целом.

Удобоукладываемость бетонной смеси зависит от объема ***цементного теста***, которое играет роль смазки, способствуя более плотному размещению зерен заполнителя. Минимальное содержание цементного теста для получения нерасслаиваемых и хорошо уплотненных бетонных смесей составляет:

- для жесткой смеси — 170…200 л/м^3;
- для подвижной и литой — 220…270 л/м^3.

На удобоукладываемость оказывают влияние ***свойства заполнителей***:

- крупность зерен, их форма и свойства поверхности;
- соотношение между мелким и крупным заполнителем.

Влияние крупности зерен заключается в следующем. С увеличением их размера уменьшается суммарная площадь контакта заполнителей с цементным тестом и, таким образом, снижается потребность в нем для «обмазки» заполнителей. При этом повышается подвижность смеси за счет меньшего межмолекулярного сцепления цементного теста с поверхностью заполнителей.

Более подвижные смеси получаются на заполнителях с окатанной формой зерен и гладкой поверхностью. Например, бетонные смеси на гравии имеют большую подвижность, чем смеси на щебне; у смесей на плотных заполнителях удобоукладываемость лучше, чем у смесей на пористых, при одинаковом расходе воды. Загрязняющие примеси обычно снижают подвижность.

Для каждой бетонной смеси имеется оптимальное соотношение между мелким (м) и крупным (к) заполнителем, при котором обеспечивается наибольшая подвижность смеси. При прочих равных условиях такая смесь легче укладывается и формирует более плотную структуру бетона. Оптимальное соотношение (м/к) зависит от многих факторов и определя-

ется экспериментально на стадии проектирования состава бетона.

Эффективным способом регулирования удобоукладываемости бетонных смесей является использование пластифицирующих добавок.

Такие добавки уменьшают расслаиваемость бетонных смесей, повышают их однородность. Однако эффективность пластифицирующих добавок снижается в жестких бетонных смесях. В этом случае рекомендуется применять воздухововлекающие добавки в количестве, обеспечивающем воздухововлечение 4...6 % от объема бетонной смеси.

В тесной связи с удобоукладываемостью находятся и такие свойства смесей, как однородность и расслоение.

Однородность смесей определяется их внутренней связностью, достаточная степень которой не позволяет им расслаиваться с отделением воды.

Расслоение смеси (***седиментация***) часто происходит при транспортировке, укладке и уплотнении смеси, в результате оседания твердых частиц под действием силы тяжести. При этом часть воды освобождается и поднимается вверх, образуя сеть сообщающихся капиллярных ходов и полостей под зернами заполнителя. В результате этих процессов структура бетонной смеси становится неоднородной, что в конечном счете приводит к неоднородности структуры затвердевшего бетона.

К расслаиванию склонны подвижные смеси с большим количеством воды затворения. Уменьшить водосодержание бетонной смеси можно путем правильного выбора материалов и соотношения (м/к) и использования пластифицирующих добавок.

5.5. Тяжелый бетон

Тяжелым называется бетон плотной структуры, приготовленный на цементном вяжущем, мелком и крупном заполнителях. Это — искусственный строительный материал сложной структуры, состоящий из зерен заполнителей различных размеров, сцементированных в монолит цементным камнем.

5.5.1. Структура бетона

Структура бетона — пространственное расположение взаимосвязанных между собой частиц различной дисперсности. В бетоне различают макро- и микроструктуру.

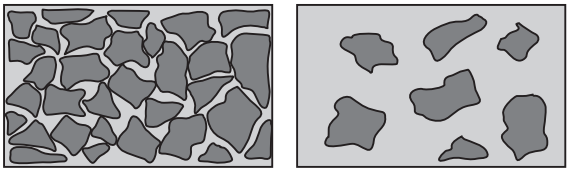
Макроструктура бетона включает:

- крупный заполнитель (щебень, гравий);
- мелкий заполнитель (песок);
- цементный камень;
- крупные воздушные поры (образуются при недоуплотнении бетонной смеси и защемлении воздуха);
- соединительные полосы и трещины (например, от усадки цементного камня или иных причин).

Различают два вида макроструктуры: контактную и с «плавающим» заполнителем.

При высокой концентрации зерен заполнителя и малом объеме цементного вяжущего формируется структура с контактным расположением зерен заполнителя. В этом случае зерна заполнителя скреплены друг с другом тонким слоем цементного камня, а пустоты между ними заполнены цементным раствором (рис. 5.3, *а*). Такая структура обеспечивает повышенную прочность бетона при сжатии, снижает опасность трещинообразования.

При увеличенном расходе цемента (подвижные, пластичные смеси) концентрация заполнителей снижается, их зерна не соприкасаются друг с другом. В результате создается структура с «плавающим» расположением зерен заполнителя (рис. 5.3, *б*). В этом случае применение высокопрочного за-



а *б*

Рис. 5.3. Виды макроструктуры бетона:
а — контактная; *б* — с «плавающим» заполнителем

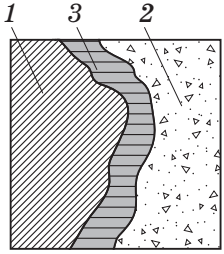


Рис. 5.4. Микроструктура бетона: *1* — зерно заполнителя; *2* — контактная (пограничная) зона цементного камня; *3* — объемный цементный камень, заполняющий межпустотное пространство

полнителя не эффективно: прочность бетона не увеличивается. Она определяется только прочностью растворной составляющей.

Микроструктура представляет собой неоднородную систему, которая состоит из цементного камня и контактной зоны между цементным камнем и заполнителем (рис. 5.4). Микроструктура видна при большом увеличении под микроскопом. Она включает:

- новообразования из прореагировавших с водой зерен цемента;
- микропоры различных размеров и строения.

К новообразованиям относятся кристаллические сростки и гелеобразные массы. Структурная пористость бетона определяется, прежде всего, микропористостью цементного камня, зависящей от начального водосодержания бетонной смеси, и воздухововлечением при ее перемешивании.

5.5.2. Микропоры в цементном камне

Различают три вида пор в цементном камне:

- капиллярные;
- гелевые;
- контракционные.

Капиллярные поры порождаются излишками воды: для химического взаимодействия с цементом достаточно 18…22 % воды от массы цемента, а для получения удобоукладываемой смеси требуется 40…60 %. Излишки, не участвующие в процессе гидратации цемента, при испарении образуют капиллярные поры.

Размер капиллярных пор изменяется в большом диапазоне: радиус микропор составляет менее 0,1 мкм, а радиус макропор — до 2 мкм. Объем капиллярных пор может достигать 40 % от объема цементного камня.

Ориентировочно объем капиллярных пор можно рассчитать по формуле

$$П_{кап} = (В/Ц - 0{,}5\alpha)(В/Ц + 0{,}32), \qquad (5.2)$$

где α — степень гидратации цемента в относительных единицах ($\alpha = 0...1$).

При этом чем больше воды взято при приготовлении бетонной смеси, тем больше образуется капиллярных пор в цементном камне. Например, при увеличении В/Ц от 0,35 до 0,70 капиллярная пористость увеличивается с 25 до 50 %. При В/Ц менее 0,25 капиллярная пористость не образуется.

Гелевые поры — самые мелкие поры с размерами 0,0015...0,030 мкм (коллоидными размерами), которые формируются в новообразованиях цементного камня. Вода в гелевых порах прочно удерживается адсорбционными силами, что делает их практически водонепроницаемыми (этому также способствует то, что молекулы воды больше размеров гелевых пор). Гелевая пористость трудно определяема. Поэтому при расчетах ее принимают равной 20 % от массы цемента. Объем гелевых пор составляет 28 % от объема новообразований в цементном камне. Такие поры оказывают влияние на усадку, ползучесть и другие деформативные свойства бетона.

Контракционные поры образуются в результате уменьшения объема системы цемент — вода при ее усадке в процессе гидратации. Они являются замкнутыми. Объем контракционных пор составляет 7...9 $см^3$ на 100 г цемента. Наличие таких пор способствует повышению морозостойкости и сульфатостойкости бетона.

Пористость цементного камня в среднем составляет около 2,5 %.

5.5.3. Общая пористость бетона

Общая пористость бетона (в %) на плотных заполнителях, представляющая собой отношение объема пор к объему материала (бетона), описывается уравнением

$$П_о = \frac{В - 0{,}23\alpha Ц}{1000} \cdot 100, \qquad (5.3)$$

где В и Ц — расход воды и цемента соответственно, кг на 1 м^3 уплотненной бетонной смеси; α — степень гидратации цемента.

Первое слагаемое в числителе дроби соответствует объему пор в цементном камне, второе — объему пор, образующихся при недоуплотнении бетонной смеси, т.е. когда $\delta < 1$.

Из формулы (5.3) следует, что общая пористость бетона тем выше, чем больше расход воды на 1 м^3 бетона, т.е. чем выше водопотребность бетонной смеси.

Общая пористость бетона уменьшается во времени с увеличением степени гидратации цемента α, и тем интенсивнее, чем больше расход цемента на 1 м^3 бетона.

Все факторы, способствующие увеличению степени гидратации цемента (например, повышенная тонкость помола цемента, благоприятные температурно-влажностные условия в начальный период твердения цемента, правильный уход за свежеуложенным бетоном, исключающий возможность испарения из него влаги в окружающую среду, и др.), способствуют уменьшению конечной пористости, т.е. повышению плотности бетона.

При вовлечении воздуха в бетонную смесь образуются сферические замкнутые достаточно крупные поры размером 0,1...2,0 мм. Эти поры оказывают положительное влияние на стойкость бетона в некоторых условиях, хотя и снижают его прочность. Например, для повышения морозостойкости в бетонную смесь специально вводят воздухововлекающие добавки, которые способствуют образованию таких равномерно распределенных по объему, так называемых «резервных», пор.

Пористость бетона зависит от степени гидратации цемента и со временем изменяется: общая и капиллярная пористость снижается, гелевая и контракционная увеличивается.

5.5.4. Основной закон прочности бетона

Экспериментальными исследованиями установлено, что прочность бетона главным образом определяется:

- водоцементным соотношением (В/Ц);
- качеством заполнителей;
- активностью цемента.

Для получения удобоукладываемых бетонных смесей принимают В/Ц = 0,4…0,7, т.е. расход воды должен составлять 40…70 % от массы цемента.

Для полной гидратации цемента необходимо около 22 % воды от массы цемента. Избыток воды, испаряясь из бетона, образует поры и капилляры различной формы и размеров. Наличие пор ослабляет бетон. Чем больше пор, т.е. выше В/Ц, тем ниже прочность бетона.

Если принять расход цемента постоянным и изменять только количество воды затворения ($В_з$), то можно установить влияние расхода воды (В) на прочность бетона $R_б$. Установленная зависимость $R_б = f(В)$ описывается кривой, имеющей два участка — восходящий и нисходящий (рис. 5.5). Аналогичный вид имеет и зависимость $R_б = f(В/Ц)$.

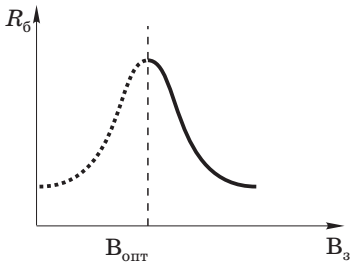


Рис. 5.5. Влияние количества воды на прочность бетона (при постоянном расходе цемента и работе уплотнения)

Левый (восходящий) участок кривой соответствует изменению прочности неудобоукладываемых бетонных смесей, слишком жестких для принятого способа уплотнения. Недоуплотнение бетонной смеси также приводит к образованию в бетоне крупных воздушных пустот, неплотностей, снижающих прочность бетона.

По мере увеличения количества воды вязкость цементного теста снижается, объем цементного теста возрастает, удобоукладываемость бетонных смесей улучшается. Максимальное значение прочности достигается при оптимальном количестве воды, соответствующем принятому способу уплотнения.

Увеличение расхода воды сверх оптимального приводит к снижению прочности, что описывается правым (нисходящим) участком кривой. В этом случае избыток воды образует в бетоне большое количество капиллярных и в некоторых случаях седиментационных пор, что приводит к снижению прочности бетона.

На прочность бетона, кроме В/Ц, оказывает влияние ряд других факторов: марка цемента, условия твердения, возраст бетона, способы приготовления и уплотнения бетонной смеси и др. Однако для упрощения расчетов в формулах прочности бетона эти факторы не учитываются.

Расчетные формулы прочности применимы для бетонов из хорошо уплотненных бетонных смесей, твердеющих в нормальных температурно-влажностных условиях и испытанных по стандартной методике в возрасте 28 сут.

Одной из первых расчетных формул для тяжелого бетона стала предложенная Н.М. Беляевым формула, устанавливающая зависимость прочности бетона от водоцементного отношения: $R_б = f(В/Ц)$. Она представляет собой гиперболу, которая объединяет точки с оптимальными значениями В/Ц при различной работе уплотнения.

Однако более удобной для применения на практике оказалась зависимость прочности бетона от цементно-водного отношения (Ц/В), которую описывает формула швейцарского ученого И. Боломея, усовершенствованная Б.Г. Скрамтаевым. Функция $R_б = f(Ц/В)$ при некотором упрощении может быть представлена линейным уравнением вида

$$R_б = AR_ц(Ц/В \pm b), \quad (5.4)$$

где A — коэффициент, учитывающий качество заполнителей; $R_ц$ — активность цемента, МПа; Ц — расход цемента в бетонной смеси, кг/м^3; В — расход воды в бетонной смеси, л/м^3; b — постоянный коэффициент, определяемый опытным путем.

Для составов бетонов с Ц/В = 1,4...2,5

$$R_б = AR_ц(Ц/В - 0,5), \quad (5.5)$$

для составов бетона с Ц/В = 2,5...3,5

$$R_б = A'R_ц(Ц/В + 0,5). \quad (5.6)$$

В данных уравнениях значение коэффициента b, определенное по статистическим данным, численно равно 0,5. Значения коэффициентов A и A' приведены в табл. 5.10.

Таблица 5.10

Значения коэффициентов A и A' в формулах прочности бетона

Характеристика заполнителей*	Значения коэффициентов	
	A	A'
Высококачественные	0,65	0,43
Рядовые	0,60	0,40
Пониженного качества	0,55	0,37

*К высококачественным заполнителям относятся щебень из плотных горных пород высокой прочности и песок промытый оптимальной крупности. К рядовым относятся заполнители среднего качества. Материалы пониженного качества — крупные заполнители низкой прочности, мелкие пески.

Прочность бетона не остается величиной постоянной. С течением времени, при достаточной влажности воздуха и положительной температуре, она увеличивается. Изменение прочности во времени описывается логарифмической зависи-

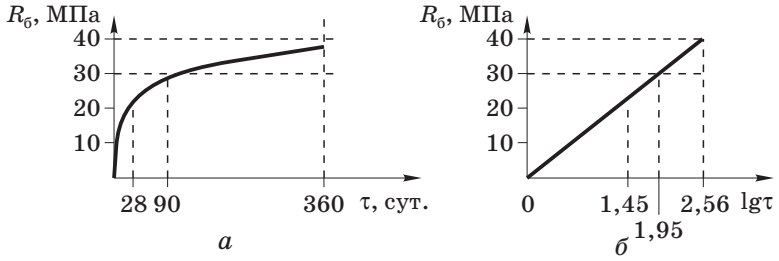


Рис. 5.6. Рост прочности бетона во времени:
а — логарифмическая зависимость $R_б = f(\tau)$; *б* — линейная зависимость $R_б = f(\lg \tau)$

мостью (рис. 5.6, *а*), которая при переходе к логарифмическому масштабу времени преобразуется в линейную зависимость (рис. 5.6, *б*). Эта линейная зависимость позволяет использовать для ориентировочного определения прочности бетона в разном возрасте формулу

$$R_\tau = R_{28} \frac{\lg \tau}{\lg 28}, \qquad (5.7)$$

где τ — расчетный возраст бетона, сут.; R_τ, R_{28} — значение прочности бетона на сжатие в возрасте τ и 28 сут. соответственно, МПа.

5.5.5. Проектирование состава бетона

Цель проектирования состава бетона — установить такое соотношение между его компонентами, которое позволяет обеспечить требуемые технологические свойства бетонной смеси и нормируемые показатели качества бетона в установленные сроки при минимальных материальных и энергетических затратах. Для обеспечения экономичности бетона, как правило, стремятся получить бетон с минимальным расходом цемента, так как последний является самым дорогостоящим компонентом.

Проектирование состава производят расчетно-экспериментальным методом, который предусматривает следующий порядок:

- выполнение предварительного расчета состава бетона с использованием формул, графиков, таблиц;
- корректировка состава на опытных замесах.

Состав бетона выражают в виде расхода материалов по массе на 1 м^3 уложенной и уплотненной бетонной смеси. Например: Ц = 320 кг/м^3; П = 680 кг/м^3; Щ = 1240 кг/м^3; В = 180 л/м^3.*

Иногда состав бетона выражают в виде количественного соотношения по массе между составляющими материалами относительно единицы массы цемента (например, Ц : П : Щ = = 1 : 2 : 4 при В/Ц = 0,5).

Принято различать *лабораторный* (*номинальный*) состав бетона, который определяют для сухих материалов, и *производственный* — на основе минеральных заполнителей с естественной влажностью.

Проектирование состава бетона выполняется в следующей последовательности:

1) назначают требования к бетону на основе информации о виде конструкции, для которой он предназначен; условий ее эксплуатации и технологии изготовления;

2) осуществляют выбор материалов для бетона;

3) производят определение расчетного состава бетона;

4) уточняют состав на пробных замесах;

5) назначают производственный состав бетона.

Требования к прочности бетона (одно из основных), а также к другим свойствам исходя из условий эксплуатации бетонных изделий (морозостойкости, водонепроницаемости, коррозионной стойкости и др.) обычно назначают в соответствии с проектно-технической документацией на конкретную конструкцию.

Удобоукладываемость бетонной смеси, если она задана, следует назначать по СНиП 3.09.01–85 «Производство сборных железобетонных конструкций и изделий» в соответствии со способом формования и видом конструкции. Значения удобоукладываемости для некоторых наиболее распространенных случаев приведены в табл. 5.11.

* Здесь и далее Ц — цемент, П — песок, Щ — щебень, В — вода.

Таблица 5.11

Требования к удобоукладываемости бетонной смеси

Конструкция и способ уплотнения	Марка по удобоукладываемости	Жесткость, с	Подвижность, см
Плиты дорожные, аэродромные, формуемые на виброплощадке	Ж1	5…10	—
То же, на роликовой установке	Ж4	31…60	—
Центрифугированные изделия	П2	—	5…9
Аэродромные, дорожные плиты, формуемые роликовым безвибрационным способом	СЖ1	50 и менее	—

Выбор материалов производится с учетом рекомендаций, приведенных в § 5.3.

Если использовать более низкие марки цемента, его расход повысится, а если слишком высокие — расчетный расход цемента может оказаться меньше минимальных значений, требуемых для получения нерасслаиваемой бетонной смеси и бетона заданной плотности. В обоих случаях составы бетона не будут отвечать требованиям экономичности.

Расчет лабораторного состава бетона производится по методу абсолютных объемов. Согласно этому методу расход всех четырех компонентов бетонной смеси должен быть таким, чтобы сумма их абсолютных объемов составляла 1000 л (при этом не учитывается объем вовлеченного воздуха):

$$\frac{Ц}{\rho_ц} + В + \frac{П}{\rho_п} + \frac{Щ}{\rho_щ} = 1000, \qquad (5.8)$$

где Ц, В, П, Щ — соответственно расход цемента, воды, песка и щебня, кг; $\rho_ц$, $\rho_п$, $\rho_щ$ — соответственно истинная плотность цемента, песка и щебня, кг/м^3.

Расход материалов определяют в следующем порядке.

1. Вычисляют *цементно-водное отношение*:

- для Ц/В < 2,5

$$Ц/В = \frac{R_б}{AR_ц} + 0{,}5, \qquad (5.9)$$

- для Ц/В > 2,5

$$Ц/В = \frac{R_б}{A' R_ц} - 0{,}5. \qquad (5.10)$$

Если к бетону предъявляются дополнительные требования по морозостойкости и водонепроницаемости, то полученные значения Ц/В сравнивают с нормированными и для дальнейших расчетов принимают большее из них.

2. Ориентировочный *расход воды* (В) принимают по табл. 5.12 в зависимости от требуемой удобоукладываемости бетонной смеси, вида и крупности заполнителя.

Таблица 5.12

Ориентировочный расход воды на 1 м^3 бетонной смеси на плотных заполнителях, л

Марка бетонной смеси по удобоукладываемости	Крупность заполнителя, мм							
	Гравий				Щебень			
	10	20	40	70	10	20	40	70
СЖ1	140	125	115	110	150	140	125	120
Ж4	150	135	125	120	160	150	135	130
Ж3	160	145	130	125	170	160	145	140
Ж2	165	150	135	130	175	165	150	155
Ж1	175	160	145	140	185	175	160	165
П1	190	175	160	155	200	190	175	170
П2	200	185	170	165	210	200	185	180
П3	215	200	190	180	225	215	200	190
П4	225	220	205	190	235	230	215	200
П5	235	230	220	220	245	240	225	210

Примечания: 1. Расход воды дан для смесей на цементе с нормальной густотой теста 27 % и песка с модулем крупности $М_{кр} = 2$.

2. При изменении нормальной густоты цементного теста на каждый процент в меньшую сторону количество воды следует уменьшить на 3...5 л/м^3, в большую сторону — увеличить на ту же величину.

3. В случае изменения модуля крупности песка в меньшую сторону на 0,5 его значения, расход воды следует увеличить на 3...5 л/м^3, а при изменении $М_{кр}$ в большую сторону — уменьшить на ту же величину.

3. *Расход цемента* определяют уже с учетом найденных значений Ц/В и В:

$$Ц = (Ц/В)В. \qquad (5.11)$$

Полученное значение расхода цемента необходимо сверить с нормативными требованиями ГОСТ 26633–91 по минимальному расходу цемента, назначаемому в зависимости от характера армирования конструкции, условий эксплуатации и вида цемента. Так, например, при использовании бездобавочного портландцемента минимальный расход составляет: для неармированных конструкций — 150 кг/м^3, для армированных ненапрягаемой арматурой, подверженных атмосферным воздействиям, — 200 кг/м^3, для конструкций с предварительно напряженной арматурой, подверженных атмосферным воздействиям, — 240 кг/м^3. Если в результате расчета по формуле (5.11) получилась величина меньше требуемой по норме, следует принять нормативное минимальное значение расхода цемента.

4. Для определения *расхода крупного и мелкого заполнителей* задаются двумя условиями:

1) сумма абсолютных объемов всех компонентов в уплотненном состоянии равна 1000 л (1 м^3);

2) цементно-песчаный раствор должен заполнить все пустоты между крупным заполнителем с учетом некоторой раздвижки зерен этим раствором. Величина раздвижки задается коэффициентом раздвижки зерен крупного заполнителя (щебня или гравия), который показывает, на сколько объем раствора превышает объем пустот.

Избыток растворной части необходим для получения удобообрабатываемой бетонной смеси и хорошего (полного) связывания зерен заполнителя в единый прочный монолит. Это условие можно записать уравнением

$$\left(Ц/\rho_ц\right) + B + \left(П/\rho_п\right) = V_{п.щ}\alpha\left(Щ/\rho^н_щ\right), \qquad (5.12)$$

где $\rho_ц$ и $\rho_п$ — истинная плотность соответственно цемента и песка; $V_{п.щ}$ — пустотность крупного заполнителя

($V_{п.щ} = 1 - \rho_н / \rho_щ$); $\rho^н_щ$ — насыпная плотность крупного заполнителя; α — коэффициент раздвижки зерен крупного заполнителя.

Значение коэффициента α для жестких бетонных смесей принимается равным 1,05...1,15. В подвижных бетонных смесях значение коэффициента раздвижки зерен изменяется в более широком интервале: α = 1,25...1,55. Величина α принимается тем больше, чем выше требуемая подвижность бетонной смеси, так как для увеличения пластичности смеси зёрна крупного заполнителя должны быть более отдалены друг от друга.

Для расчета состава бетона может быть использована зависимость α от объема цементного теста $V_{ц.т}$ (рис. 5.7).

Объем цементного теста рассчитывается по формуле

$$V_{ц.т} = Ц/\rho_ц + В. \qquad (5.13)$$

Решая систему уравнений (5.8) и (5.12), можно рассчитать необходимое количество щебня (гравия) на 1 м^3 бетона:

$$Щ = \frac{1000}{\alpha V_{п.щ} / \rho^н_щ + 1 / \rho_щ}, \qquad (5.14)$$

где $\rho^н_щ$, $\rho_щ$ — соответственно насыпная и истинная плотность щебня (гравия), кг/м^3.

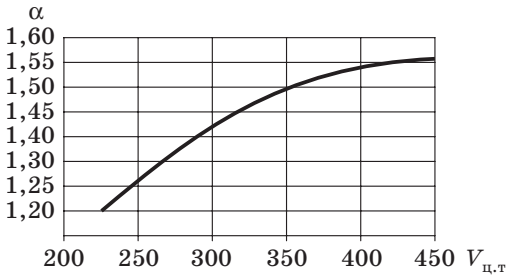


Рис. 5.7. Зависимость коэффициента раздвижки α от объема цементного теста для подвижных смесей

Расчет расхода мелкого заполнителя (песка П) на 1 м^3 бетона выполняется по формуле

$$П = \left[1000 - \left(Ц/\rho_ц + В + Щ/\rho_щ\right)\right]\rho_п. \qquad (5.15)$$

Для обычных тяжелых бетонов расчетная плотность бетонной смеси в уплотненном состоянии, определяемая по формуле

$$Р_{б.с} = Ц + В + П + Щ, \qquad (5.16)$$

находится в пределах 2350...2450 кг/м^3.

Расчетный состав бетона ***уточняется на пробных замесах***. Вначале готовится замес бетонной смеси для проверки удобоукладываемости. Вследствие особенностей применяемого цемента и местных заполнителей возможно отличие величины осадки конуса или жесткости бетонной смеси от принятой в расчете. Если смесь оказывается более подвижной, добавляют небольшое количество песка и крупного заполнителя (примерно по 5...10 %) до обеспечения требуемой удобоукладываемости; если менее подвижной — добавляют небольшое количество воды (5...10 %) и на столько же увеличивают расход цемента, чтобы сохранить расчетное цементно-водное отношение.

Пробные замесы повторяют до тех пор, пока не получат требуемые показатели удобоукладываемости.

В обоих случаях производят перерасчет состава по фактической плотности бетонной смеси, полученной при способе уплотнения, принятом в производственных условиях.

Из бетонной смеси, откорректированной по удобоукладываемости, изготовляют контрольные образцы, которые после твердения в нормальных условиях в течение 28 сут. испытывают на прочность на сжатие. Если прочность контрольных образцов отличается от заданной более чем на 15 %, количество цемента корректируют, изготовляют контрольные образцы и снова их испытывают. Результатом экспериментальной проверки расчетного состава бетона является новый уточненный состав, учитывающий свойства конкретных материалов.

В производственных условиях для приготовления бетонных смесей зачастую используются влажные заполнители.

Дополнительная вода, содержащаяся в заполнителях, приводит к необходимости корректировки составов. В результате пересчета расхода материалов с учетом фактической влажности заполнителей получают ***производственный (рабочий) состав бетона***.

Вначале рассчитывают количество воды, привнесенное заполнителями:

$$\Delta В_п = П W_п, \quad (5.17)$$

$$\Delta В_щ = Щ W_щ, \quad (5.18)$$

где $W_п$, $W_щ$ — влажность песка и крупного заполнителя, %; $\Delta В_п$ и $\Delta В_щ$ — количество воды, содержащееся соответственно в песке и щебне, кг/м^3.

Затем устанавливают расход воды с учетом влажности заполнителей:

$$В_w = В - (\Delta В_п + \Delta В_щ). \quad (5.19)$$

Чтобы сохранить расчетное количество заполнителей в смеси, их расход увеличивают на то количество воды, которое в них содержится. В производственном составе расходы песка и щебня, с учетом влажности, будут:

$$П' = П + \Delta В_п; \quad (5.20)$$

$$Щ' = Щ + \Delta В_щ. \quad (5.21)$$

Расход цемента при пересчете в производственном составе остается неизменным.

Объем бетонной смеси всегда меньше суммарного объема ее компонентов в насыпном состоянии. Это объясняется тем, что в процессе перемешивания более мелкие зерна заполняют пустоты в более крупных, цементное тесто заполняет пустоты в самых мелких зернах. Для оценки объема получаемой смеси рассчитывается *коэффициент выхода бетонной смеси*:

$$\beta = \frac{1000}{Ц/\rho'_ц + П/\rho'_п + Щ/\rho'_щ}, \quad (5.22)$$

где $\rho'_ц, \rho'_п, \rho'_щ$ — насыпная плотность цемента, песка, щебня, кг/м^3.

Коэффициент β используется также для оценки качества уплотнения бетонной смеси и расчета производительности бетоносмесителей. Среднее значение коэффициента выхода для тяжелых бетонов составляет 0,67, для легких — 0,75.

5.5.6. Основы технологии бетона

Производство бетона включает следующие основные технологические процессы:

- приготовление бетонной смеси;
- транспортирование бетонной смеси;
- укладка и уплотнение бетонной смеси;
- твердение бетона.

Приготовление бетонной смеси. Осуществляется при последовательном выполнении дозирования и перемешивания компонентов бетонной смеси.

Дозирование компонентов должно обеспечить точность взвешивания, гарантирующую соответствие фактического состава заданному. Согласно требованиям ГОСТ 7473–94, погрешность дозирования для цемента, воды и добавок должна быть не более ±1 %, заполнителей ±2 %. Все материалы, кроме пористых заполнителей, дозируют по массе; последние дозируют по объему с корректировкой по массе. Для дозирования используют автоматические дозаторы, обеспечивающие не только требуемую точность взвешивания, но и малую продолжительность операции.

Перемешивание должно обеспечить однородность бетонной смеси за счет равномерного распределения компонентов по всему объему смеси.

Перемешивание отдозированных компонентов производят в бетоносмесителях различной конструкции. Смешивание компонентов происходит за счет многократного перемешивания частиц и отдельных объемов бетонной смеси, в процессе чего преодолеваются внутренние силы: трения, сцепления, тяжести и сопротивления смеси сдвигу. Величина этих сил зависит от состава бетонной смеси и свойств исходных ма-

териалов. Подвижные смеси с большим содержанием воды и цемента смешиваются значительно легче, чем жесткие смеси с малым расходом цемента, в которых внутренние связи более прочные. Крупнозернистые смеси перемешиваются легче, чем мелкозернистые; смеси с легким заполнителем смешиваются труднее, чем с плотным. Эти особенности бетонных смесей учитываются при выборе смесителя и режима перемешивания.

Бетоносмесители по принципу перемешивания подразделяют на *гравитационные* и *принудительного действия*, по режиму работы — на *циклические* (периодического действия) и *непрерывного действия*.

В *гравитационных смесителях* (рис. 5.8) перемешивание происходит во вращающемся барабане с горизонтальной или наклонной осью вращения. Отмеренные компоненты бетонной смеси загружают в бетоносмеситель. Порции материала при вращении поднимаются корытообразными лопастями в крайнее верхнее положение, откуда они свободно падают и внедряются в бетонную смесь в нижней части барабана. Так в результате многократного подъема и падения происходит перемешивание.

Стационарные гравитационные смесители периодического действия имеют вместимость 750, 1200, 1500, 2400 и 3000 л, частоту вращения барабана 13...20 об./мин.

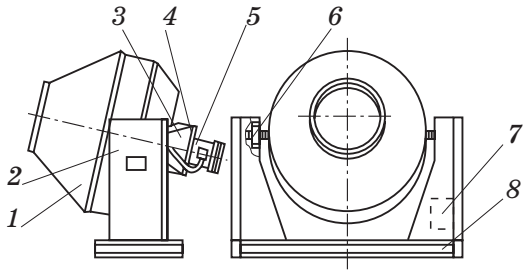


Рис. 5.8. Бетоносмеситель гравитационного действия:
1 — барабан; *2* — боковая стойка; *3* — траверса; *4* — редуктор; *5* — электродвигатель; *6* — цапфа; *7* — механизм опрокидывания барабана; *8* — рама

Длительность перемешивания, зависящая от объема бетоносмесителя и марки бетонной смеси по удобоукладываемости, назначается опытным путем или по данным табл. 5.13.

Таблица 5.13

Рекомендуемая продолжительность перемешивания бетонных смесей на плотных заполнителях в стационарных смесителях, с, не менее

Вместимость смесителя по загрузке, л	Гравитационные смесители для марки по удобоукладываемости			Смесители принудительного действия для смесей всех марок по удобоукладываемости
	Ж1, П1	П2	П3-П5	
750 и менее	90	75	60	50
Свыше 750 до 1500	120	105	90	50
Свыше 1500	150	135	120	50

Для перемешивания жестких бетонных смесей гравитационные смесители не применяются, так как не могут обеспечить однородность смеси даже при увеличении длительности перемешивания. В этих случаях используют *бетоносмесители принудительного действия*. Внутри корпуса таких смесителей установлены специальные смешивающие устройства (лопатки, лопасти и др.), которые прикреплены к вращающимся вертикальным или горизонтальным валам. Эти устройства задают компонентам бетонной смеси принудительное перемешивание.

Смесители ***непрерывного*** действия находят применение при больших объемах производства бетонной смеси постоянного состава, например для дорожного строительства.

Циклические смесители по принципу действия подразделяются:

- на противоточные с вращающимся корпусом (рис. 5.9, ***а***);
- роторные с неподвижным корпусом (рис. 5.9, ***б***).

Общий вид роторного смесителя показан на рис. 5.10.

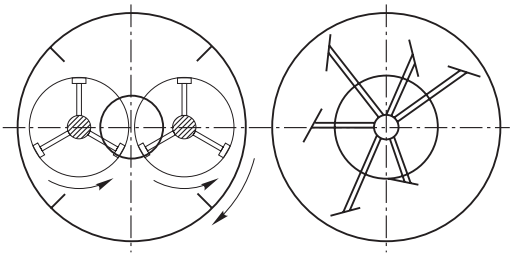


Рис. 5.9. Схемы циклических бетоносмесителей принудительного действия:
а — противоточный двухвальный смеситель с вращающейся горизонтальной чашей; *б* — роторный

Вместимость циклических смесителей составляет 500, 750, 1500 л, частота вращения рабочего органа — 15…40 об./мин.

Одновальные смесители используют только для смешивания компонентов мелкозернистого бетона, двухвальные — для приготовления обычных бетонных смесей с крупным заполнителем.

Для непрерывного приготовления смесей обычно применяют двухвальные лопастные смесители с горизонтально расположенными валами. Валы вращаются в разные стороны, и лопасти не только перемешивают все компоненты смеси, но

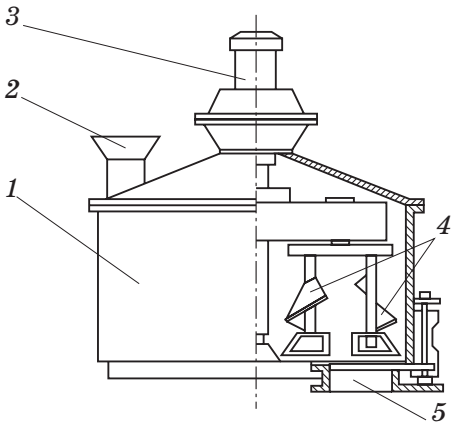


Рис. 5.10. Роторный бетоносмеситель:
1 — смесительный барабан; *2* — загрузочная воронка; *3* — электродвигатель; *4* — смесительные лопатки; *5* — выгрузочное устройство

и постепенно перемещают смесь от загрузочного отверстия к разгрузочному.

Транспортирование бетонной смеси. При транспортировании смеси необходимо обеспечить ее однородность и нерасслаиваемость.

Транспортирование смеси к месту укладки (дорожное строительство) или формования (завод бетонных и железобетонных изделий) производится различными транспортными средствами:

- автобетоносмесителями (при перевозке на дальние расстояния);
- автобетоновозами, автосамосвалами (на близкое расстояние).

На предприятиях сборного железобетона доставку бетонной смеси производят ленточными транспортерами, бетононасосами или вагонетками, которые перемещаются по рельсовым путям.

Укладка и уплотнение бетонной смеси. Эти операции должны обеспечивать получение однородного по плотности и прочности бетона.

В заводских условиях бетонную смесь укладывают и уплотняют специальным оборудованием, которое перемещается при помощи кранов, а для очень подвижных смесей используют систему пневмотранспорта.

В процессе уплотнения под нагрузкой происходят следующие процессы:

- идет сближение частиц бетонной смеси;
- более компактно размещаются зерна заполнителей;
- вытесняются пузырьки воздуха;
- отделяется небольшое количество воды.

Качество уплотнения характеризуется коэффициентом уплотнения $K_у$, который представляет собой отношение фактической средней плотности бетонной смеси ($\rho_{ср}$) к теоретической ($\rho_т$), которую определяют в лабораторных условиях:

$$K_у = \frac{\rho_{ср}}{\rho_т}. \qquad (5.23)$$

Среднее значение $K_у$ для обычных тяжелых бетонов (с маркой по удобоукладываемости Ж1, П1, П2) находится в пределах 0,96...0,97.

Формуемость бетонных смесей и способы их уплотнения тесно взаимосвязаны.

Вибрирование — наиболее эффективный метод укладки, основанный на использовании тиксотропных свойств бетонной смеси. При вибрировании частицам бетонной смеси передаются быстрые колебательные движения от источника колебаний — вибратора. При этом бетонная смесь как бы превращается в тяжелую жидкость, которая эффективно уплотняется. При недостаточном времени вибрирования бетонная смесь уплотняется не полностью, при избыточном — смесь может расслоиться.

Режим виброуплотнения определяется следующими параметрами:

- амплитудой и частотой колебаний;
- интенсивностью и продолжительностью уплотнения.

Критерий интенсивности колебаний рассчитывается по формуле

$$И = 8\pi A^2 f^3, \qquad (5.24)$$

где И — интенсивность вибрирования, $см^2/с^3$; А — амплитуда колебаний, см; f — частота колебаний, $с^{-1}$, Гц.

Для каждой бетонной смеси есть своя оптимальная величина интенсивности: при ее превышении может произойти разрушение и расслоение структуры, полученной в результате уплотнения. Интенсивность колебаний регулируется изменением их амплитуды и частоты.

Наиболее распространенным оборудованием для уплотнения бетонных смесей являются *стационарные виброплощадки* (рис. 5.11) с частотой колебаний около 3000 $мин^{-1}$. Для обычных бетонных смесей амплитуда колебаний находится в диапазоне 0,3...0,7 мм, для мелкозернистых смесей значение амплитуды уменьшается до 0,15...0,4 мм. Такие значения амплитуд являются оптимальными и их повышение может привести к разуплотнению бетонной смеси.

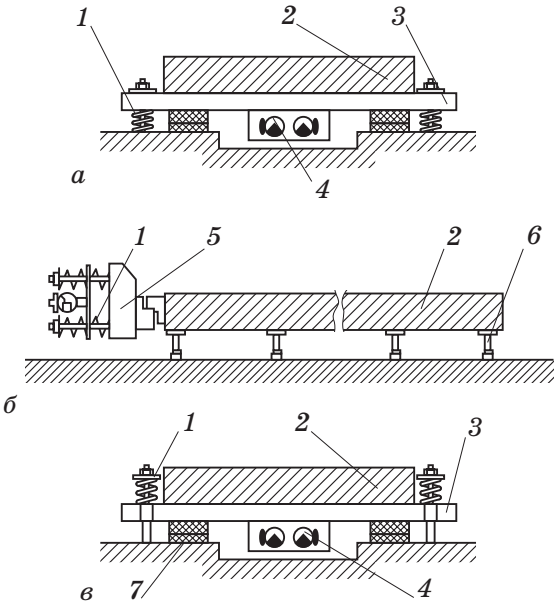


Рис. 5.11. Схемы основных видов виброплощадок:
а — площадка с вертикально направленными колебаниями; *б* — установка с горизонтально направленными колебаниями; *в* — ударная вибрационная площадка; *1* — пружины; *2* — форма с бетонной смесью; *3* — рабочий орган (рама); *4* — вибровозбудитель колебаний; *5* — резонансная плита; *6* — упругие опоры; *7* — упругие прокладки (ударники)

Увеличить интенсивность колебаний можно за счет повышения частоты. Оптимальная частота колебаний находится в пределах 3000...6000 мин$^{-1}$ и зависит от крупности заполнителя: чем мельче заполнитель, тем больше должна быть частота.

Виброуплотнение бетонных смесей в больших массивах производится *переносными глубинными вибраторами* (рис. 5.12) с частотой колебаний 6000...20 000 мин$^{-1}$.

В зависимости от вида и формы бетонируемой конструкции применяют различные формы вибраторов.

При бетонировании конструкций большой площади и толщиной до 200...300 мм (например, бетонных покрытий до-

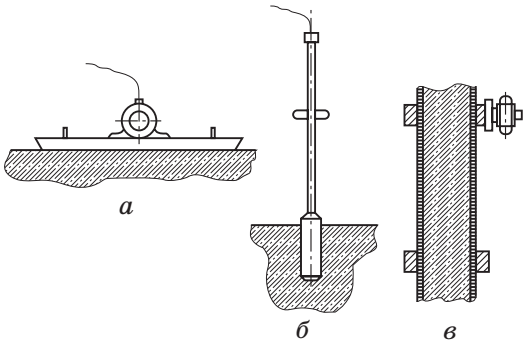


Рис. 5.12. Вибраторы:
а — поверхностный; *б* — глубинный;
в — навесной

рог, полов промышленных предприятий и др.) используют поверхностные вибраторы (см. рис. 5.12, *а*), массивных элементов значительной толщины — глубинные вибраторы (см. рис. 5.12, *б*) с наконечниками различной формы и размеров. Часто применяют несколько вибраторов, которые собирают в пакеты. Тонкостенные бетонные конструкции, насыщенные арматурой (колонны, несущие стены) уплотняют наружными вибраторами, прикрепляемыми к поверхности опалубки (например, см. рис. 5.12, *в*).

Мелкозернистый бетон обычно укладывают методами ***торкретирования*** с помощью цемент-пушки или пневмобетонирования. В первом случае в цемент-пушку засыпают сухую смесь для мелкозернистого бетона, которая сжатым воздухом подается по гибкому шлангу к месту укладки бетона. К выходному отверстию гибкого шланга по другому шлангу под давлением поступает в нужном количестве вода. При выходе из отверстия сопла сухая смесь смачивается водой и в готовом виде наносится на бетонируемую поверхность. При таком способе укладки получается мелкозернистый бетон высокой плотности, прочности, морозостойкости и водонепроницаемости.

Твердение бетона. Нормальный рост прочности бетона происходит при положительной температуре (15…25 °С) и посто-

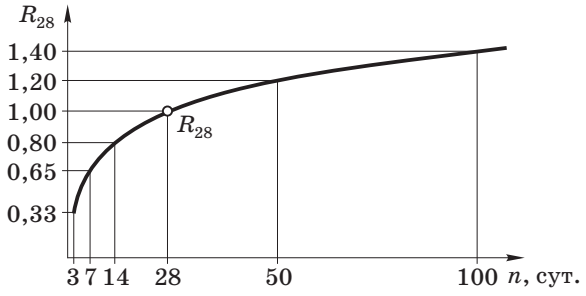


Рис. 5.13. Изменение прочности бетона во времени (R_{28} — марочная прочность бетона; n — время твердения)

янной влажности. Соблюдение этих условий особенно важно в первые 10...15 сут. твердения, когда бетон интенсивно набирает прочность (рис. 5.13). Чтобы предохранить поверхность бетона от высыхания, ее покрывают песком, опилками и периодически увлажняют их. Эффективной является защита полимерными пленками, битумными полимерными эмульсиями, широко используемая при строительстве дорожных цементобетонных покрытий.

В зимнее время твердеющий бетон предохраняют от замерзания методом термоса, когда подогретую бетонную смесь защищают теплоизоляционными материалами, и подогревом бетона во время твердения (в том числе и электропрогревом).

С повышением температуры скорость химических реакций взаимодействия цемента с водой увеличивается и твердение бетона ускоряется, но при обязательном условии обеспечения влажности среды (при испарении влаги из бетона его твердение практически прекращается; в обезвоженном бетоне образуются трещины и снижается его прочность).

Высокая температура (порядка 60...100 °С) при условии обеспечения близкой к 100 % влажности среды значительно ускоряет химические реакции в бетоне, что приводит к увеличению прочности в начальные сроки. Такой вид тепловлажностной обработки называется ***пропариванием.*** Прочность бетона, пропаренного в течение 7...14 ч, составляет около 70 % от проектной.

Пропаривание широко применяется на заводах сборного железобетона для ускорения твердения изделий.

Для получения бетона плотной структуры из подвижных смесей используют способы уплотнения с удалением некоторого количества воды затворения: центрифугирование и вакуумирование.

При ***центрифугировании*** бетонная смесь уплотняется под действием центробежных сил при вращении формы. Способ используется для изготовления полых трубчатых конструкций.

Уплотнение и отжатие части воды из бетонной смеси при ***вакуумировании*** происходит за счет создания разрежения (снижения давления в бетонной смеси). Для повышения эффективности его используют совместно с вибрацией (***вибровакуумирование***).

5.5.7. Свойства бетона

К физико-механическим свойствам бетона относится ряд свойств, характеризующих его качество:

- прочность;
- морозостойкость;
- водонепроницаемость;
- деформативность;
- усадка;
- теплопроводность;
- огнестойкость.

Бетон характеризуется неоднородностью структуры, что приводит к неоднородности его свойств. Неоднородность структуры обусловлена изменчивостью свойств материалов, составляющих бетон, колебаниями параметров технологических процессов, влиянием неучтенных факторов (износ оборудования, температура, влажность окружающей среды, погрешности при испытаниях и т.д.).

В связи с изложенным, показатели свойств бетона можно считать величинами случайными, т.е. при испытании образцов одного и того же материала мы получаем разные значения, которые не можем предсказать заранее.

Для оценки случайных величин используются статистические характеристики: среднее арифметическое, среднеквадратическое отклонение S и коэффициент вариации $К_в$. Последние две характеристики используются для оценки однородности свойств бетона и зависят от разброса, т.е. отклонения данных от среднего значения. Чем больше разброс данных относительно среднего, тем больше значения S и $К_в$ и меньше однородность бетона. Среднеквадратическое отклонение рассчитывается по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum\left(R_i - \overline{R}\right)^2}{n-1}}, \qquad (5.25)$$

где R_i — прочность i-го образца; n — количество образцов; $\overline{R}$ — среднее значение прочности,

$$\overline{R} = \frac{\Sigma R_i}{n}. \qquad (5.26)$$

Коэффициент вариации вычисляется по формуле

$$К_в = \frac{S}{\overline{R}}. \qquad (5.27)$$

Чем меньше коэффициент вариации, тем однороднее бетон. Нормативный коэффициент вариации равен 13,5 %. Он характеризует технологию бетонных работ как удовлетворительную. Для снижения коэффициента вариации необходимо тщательно выполнять все технологические рекомендации, повышать общую культуру производства бетонных работ.

Прочность бетона. Это важнейший показатель качества конструкционных бетонов.

Под действием внешних нагрузок в бетоне возникают внутренние напряжения сжатия, растяжения, изгиба. Бетон хорошо работает на сжатие и значительно хуже на растяжение. Поэтому в конструкциях его используют, прежде всего, для восприятия сжимающих нагрузок.

Основной характеристикой бетона является прочность на сжатие $R_{сж}$, которая контролируется для всех конструк-

ционных бетонов. Прочность на растяжение при изгибе $R_{р.и}$ и на осевое растяжение $R_р$ определяется только в некоторых случаях.

Фактическая ***прочность бетона на сжатие*** $R_{сж}$ определяется испытанием контрольных образцов, изготовленных из той же бетонной смеси, что и конструкция, и твердевших в одинаковых с ней условиях. Величина прочности рассчитывается как среднее арифметическое результатов испытаний серии, состоящей из нескольких образцов. Прочность на одноосное сжатие определяют испытанием образцов-кубов с размером ребра 15 см на гидравлическом прессе. Допускается использовать кубы других размеров, но при этом результат следует умножать на соответствующие переходные коэффициенты, для учета масштаба образцов.

Прочность на растяжение при изгибе $R_{р.и}$ определяют путем испытания балочек квадратного сечения, размеры которых зависят от наибольшей крупности зерен заполнителя. Испытания производят по схеме балки на двух опорах с приложением двух сосредоточенных сил на середине пролета. Прочность на растяжение при изгибе является одним из показателей назначения (показателей качества) бетона для дорожных и аэродромных покрытий.

Прочность на осевое растяжение $R_р$ определяют испытанием образцов-«восьмерок» на разрывной машине. Прочность бетона на осевое растяжение в 15–20 раз меньше, чем прочность на сжатие, и связана с прочностью на растяжение при изгибе соотношением $R_р = 0{,}58R_{р.и}$.

Для оценки прочности бетона используют его класс или марку.

Марка бетона — численная характеристика какого-либо его свойства, определенная как среднее значение результатов испытаний и не учитывающая колебаний свойств во всем объеме бетонируемой конструкции.

Наиболее распространенной характеристикой бетона является *марка по прочности на сжатие*. Ее определяют испытанием на осевое сжатие бетонных образцов-кубов размером 15×15×15 см в возрасте 28 сут. Численной характеристикой марки является среднее арифметическое значение прочности

при сжатии образцов, полученное по двум наибольшим значениям в серии из трех образцов. Для марок бетона прочность выражается в кг/см^2.

Установлены следующие марки тяжелого бетона по прочности на сжатие: М50, М75, М100, М150, М200, М250, М300, М400, М500 и выше с интервалом 100 до М1000 (цифра указывает предел прочности на сжатие).

По *прочности на осевое растяжение* тяжелый бетон имеет следующие марки: P_t 5; P_t 10 и далее через 5 кгс/см^2 до P_t 50.

Для бетонов, применяемых для изготовления изгибаемых железобетонных конструкций, введены *марки по прочности на растяжение при изгибе*: $P_{tв}$ 5; $P_{tв}$ 10 и далее через 5 кгс/см^2 до $P_{tв}$ 90; $P_{tв}$ 100.

Поскольку марка бетона не учитывает фактическую неоднородность прочности, то это может привести к тому, что в одних конструкциях прочность бетона окажется намного ниже требуемой по расчету, а в других будет неоправданно завышена. В связи с этим используется другая оценка — класс бетона по прочности.

Класс бетона — это численная характеристика какого-либо его свойства, принимаемая с гарантированной обеспеченностью (обычно 0,95). Это означает, что свойство бетона, установленное данным классом (например, его прочность), будет обеспечено не менее чем в 95 случаях из 100.

В настоящее время установлены следующие *классы* тяжелого бетона *по прочности на сжатие*: В3,5; В5; В7,5; В10; В15; В20; В22,5; В25; В30; В35; В40; В45; В50; В60; В65; В70; В75 и В80 (число обозначает предел прочности на сжатие в МПа).

Так, например, предел прочности на сжатие бетона класса В35 должен быть не ниже 35 МПа с гарантированной обеспеченностью 0,95.

В некоторых случаях устанавливают также *классы бетона по прочности на осевое растяжение* (B_t) и *на растяжение при изгибе* ($B_{tв}$). Бетон работает на растяжение гораздо хуже, чем на сжатие: предел прочности на растяжение в 10…20 раз меньше, чем предел прочности на сжатие. Поэтому для обеспечения прочности конструкций, работающих на растяже-

ние при изгибе, в бетон закладывают стальную арматуру, которая хорошо работает на растяжение.

Связь между гарантированной прочностью бетона (классом В) и средней прочностью $\overline{R}$ (маркой бетона М) определяется выражением

$$\mathrm{B} = \overline{R}\left(1 - t\mathrm{K}_{\text{в}}\right), \tag{5.28}$$

где t — статистический критерий, зависящий от обеспеченности (при обеспеченности 0,95 t = 1,64).

Тогда

$$\mathrm{B} = \overline{R}\left(1 - 1{,}64\mathrm{K}_{\text{в}}\right). \tag{5.29}$$

Значение $\mathrm{K}_{\text{в}}$ определяется при статистическом контроле прочности на предприятии, а при отсутствии данных принимается равным нормативному значению $\mathrm{K}_{\text{в}}^{\text{н}} = 0{,}135$ (13,5 %). При этом средняя прочность (марка) составит:

$$\overline{R} = \frac{\mathrm{B}}{1 - t\mathrm{K}_{\text{в}}} = \frac{\mathrm{B}}{1 - 1{,}64 \cdot 0{,}135} = \frac{\mathrm{B}}{0{,}7786}. \tag{5.30}$$

Соотношение между классами бетона по прочности на сжатие и растяжение и его соответствующими марками при нормативном коэффициенте вариации $\mathrm{K}_{\text{в}}$ приведено в табл. 5.14.

Таблица 5.14

Соотношение между марками и классами тяжелого бетона по прочности

Класс бетона	Средняя прочность бетона данного класса, кгс/см^2	Ближайшая марка бетона	Отклонение средней прочности бетона данного класса от марки, %
	Сжатие		
В3,5	45,8	М50	–9,2
В5	65,5	М75	–14,5
В7,5	98,2	М100	–1,8
В10	131,0	М150	–14,5
В12,5	163,7	М150	+8,4

Окончание табл. 5.14

Класс бетона	Средняя прочность бетона данного класса, кгс/см^2	Ближайшая марка бетона	Отклонение средней прочности бетона данного класса от марки, %
B15	196,5	M200	–1,8
B20	261,9	M250	+4,5
B25	327,4	M350	–6,9
B30	392,9	M400	–1,8
B35	458,4	M450	+1,6
B40	523,9	M500	+5,0
B45	589,4	M600	–1,8
B50	654,8	M700	–6,9
B55	720,3	M700	+2,8
B60	785,8	M800	–1,8
B65	851,5	M900	–5,7
B70	917,0	M900	+1,8
B75	932,5	M1000	–1,8
B80	1048,0	M1000	+4,9
Осевое растяжение			
$B_t0,4$	5,2	P_t5	+3,8
$B_t0,8$	10,5	P_t10	+4,8
$B_t1,2$	15,7	P_t15	+4,5
$B_t1,6$	20,9	P_t20	+4,3
$B_t2,0$	26,2	P_t25	+4,6
$B_t2,4$	31,4	P_t30	+4,5
$B_t2,8$	36,7	P_t35	+4,6
$B_t3,2$	41,9	P_t40	+4,5

В процессе производства бетона контролируется величина средней прочности с учетом класса бетона. Для обеспечения этой прочности проектируют состав бетона.

Морозостойкость. Для получения морозостойкого бетона используются бездобавочные портландцементы или порт-

ландцементы с ограниченным количеством добавок (содержание $3CaO \cdot SiO_2$ ограничивается 45…55 %, $3CaO \cdot Al_2O_3$ — 3…9 %). Крупный заполнитель должен иметь морозостойкость не ниже морозостойкости бетона. Для уменьшения водопотребности и сокращения количества микропор в бетоне используют различные добавки: ПАВ, воздухововлекающие, гидрофобизирующие и пластифицирующие. Воздухововлекающие добавки создают «резервную» пористость и они наиболее часто применяются. Объем воздухововлечения составляет 4…6 % от объема бетона и более 20 % от объема замерзающей воды.

Обычно для морозостойких бетонов В/Ц ≤ 0,5.

Марка бетона по морозостойкости F определяется числом циклов попеременного замораживания и оттаивания водонасыщенных образцов, испытываемых в возрасте 28 сут. При этом допускается снижение прочности бетона на сжатие не более чем на 15 %.

Марку по морозостойкости назначают и контролируют для бетона гидротехнических сооружений, мостовых, дорожных и аэродромных покрытий.

Установлены следующие марки тяжелого бетона по морозостойкости: F50, F75, F100, F150, F200, F300, F400, F500, F600, F800 и F1000 (число обозначает количество циклов замораживания-оттаивания.

Водонепроницаемость. Для некоторых конструкций имеет большое значение оценка бетона по водонепроницаемости.

Марка по водопроницаемости назначается для бетонов конструкций, которые должны обладать ограниченной проницаемостью при одностороннем давлении воды.

За марку по водопроницаемости принимают наибольшее давление воды (кгс/см^2), которое выдерживают образцы бетона диаметром и высотой 150 мм при испытании по установленной методике.

Утверждены следующие марки бетона по водопроницаемости: W2, W4, W6, W8, W10, W12, W14, W16, W18 и W20.

Для повышения водонепроницаемости бетона применяют дивинилстирольный латекс в количестве 5 % от массы цемента (повышает водонепроницаемость бетона в 1,5–2 раза) или

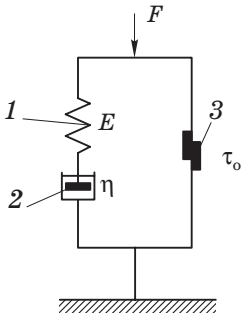


Рис. 5.14. Упрощенная реологическая модель бетона: *1* — пружина (упругий элемент); *2* — поршень, движущийся в вязкой жидкости (характеризует вязкие свойства бетона); *3* — элемент из пластинок, скользящих друг по другу (отражает пластические свойства, например ползучесть)

хлорное железо $FeCl_3$ в количестве 1 % от массы цемента (увеличивает водонепроницаемость бетона на 2–3 марки).

Основным способом повышения водонепроницаемости затвердевшего бетона является его пропитка мономером с последующей полимеризацией.

Деформативность бетона. Бетон под нагрузкой ведет себя не как идеально упругое тело (например, стекло), а как упруго-вязко-пластичное тело (рис. 5.14). При нагружении бетона сначала приходит в действие упругий элемент — пружина *1*. Процесс деформации характеризуется модулем упругости *E*. Когда нагрузка *F* преодолеет трение между пластинками *3*, которое характеризует предел текучести τ_o, возникает пластическая деформация, характеризуемая вязкостью η. Графически изложенное показано на рис. 5.15. Полная деформация складывается из упругой части $\varepsilon_у$ и пластической $\varepsilon_{пл}$. Остаточная деформация $\varepsilon_{ост}$ для бетона незначительна.

При постоянной нагрузке деформация бетона увеличивается во времени и прекращается только через несколько лет, т.е. бетон «ползет» подобно очень вязкой массе.

Ползучесть бетона объясняется пластическими свойствами влажного цементного геля, а также возникновением и развитием микротрещин. При высоких напряжениях по-

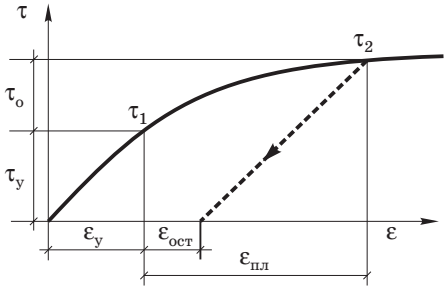


Рис. 5.15. Развитие деформации в бетоне : τ_1 — напряжение, при котором заканчивается упругое деформирование; τ_2 — напряжение, при котором заканчивается пластическое деформирование и начинается ползучесть

является пластическая деформация кристаллической структуры.

Меньшая ползучесть наблюдается при применении высокомарочных цементов и плотного заполнителя. С увеличением В/Ц ползучесть возрастает, так как цементный гель становится менее вязким, а бетон — более пористым. Преждевременное высыхание бетона ухудшает его структуру и увеличивает ползучесть (недостаток воды не дает цементу полностью гидратироваться).

Усадка бетона. При твердении бетона на воздухе происходит уменьшение его первоначального объема — ***усадка*** (сокращение линейных размеров до 0,3…0,8 мм на 1 м длины). Большие усадочные деформации — одна из причин образования трещин в бетоне. В первые сутки твердения усадка может достигать 70 % от месячного значения.

Усадка бетона слагается из влажностной ($У_{вл}$), карбонизационной ($У_к$) и контракционной ($У_{кон}$):

$$\Sigma У = У_{вл} + У_к + У_{кон}.$$

Влажностная усадка является результатом сближения частиц геля при испарении воды.

Карбонизационная усадка вызвана уменьшением объема цементного камня при взаимодействии его составной части

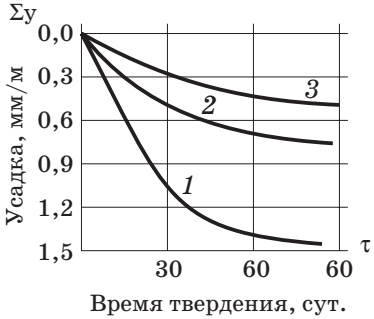


Рис. 5.16. Кривые усадки цементного камня (*1*), цементного раствора (*2*) и бетона (*3*)

($Ca(OH)_2$) с атмосферным углекислым газом с образованием карбоната кальция:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O.$$

Этот вид усадки особенно заметен у ячеистых бетонов.

Контракционная усадка вызвана уменьшением объема новообразований цементного камня по сравнению с объемом вступивших в химическое взаимодействие воды и цемента. Величина этой усадки невелика.

Наибольшую усадку имеет цементный камень (рис. 5.16). Введение плотных заполнителей уменьшает количество вяжущего в единице объема материала, что препятствует усадке.

Усадка бетона может развиваться в течение 10...15 лет, пока в нем не установится равновесная влажность.

Теплопроводность. ***Теплопроводность бетонов*** — способность бетонов проводить теплоту. Степень проводимости теплоты бетоном оценивается *коэффициентом теплопроводности* λ (Вт/(м · К)).

Теплопроводность бетонов резко возрастает с увеличением их влажности и плотности, поскольку теплопроводность воздуха, замещаемого водой в порах бетона, примерно в 30 раз меньше теплопроводности воды.

С увеличением средней плотности бетона его теплопроводность возрастает. Так, для тяжелого бетона плотностью 2200...2500 кг/м^3 теплопроводность составляет 1,1...1,5 ккал/(м · ч · °С) (1,28...1,74 Вт/(м · К)).

Огнестойкость. Под ***огнестойкостью*** понимают способность бетона сохранять прочность при кратковременном воздействии высоких температур (например, при пожаре).

При нагреве до высокой температуры вследствие различных коэффициентов линейного расширения цементного раствора и крупного заполнителя в бетоне возникают большие внутренние напряжения, что приводит к уменьшению сцепления между его составляющими и понижению прочности. При температуре 547 °С начинается разложение гидрата оксида кальция по уравнению

$$Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O,$$

что приводит к разрушению кристаллического сростка цементного камня и дальнейшему понижению прочности бетона.

Однако бетон достаточно огнестоек, что объясняется его малой теплопроводностью, а также тем, что при нагревании разрушаются кристаллогидраты цементного камня и выделяется адсорбционно и химически связанная вода, на испарение которой затрачивается значительное количество тепла. Вследствие этого интенсивность прогрева бетона уменьшается.

5.6. Бетоны специального назначения

В конструкциях, которые эксплуатируются в специфических условиях, применяют бетоны специального назначения, обеспечивающие безотказную работу конструкции в течение заданного срока службы. К таким видам бетонов могут быть отнесены некоторые разновидности тяжелого бетона (гидротехнический бетон, бетон для дорожных и аэродромных покрытий и др.), а также специальные бетоны по классификации ГОСТ 25192–82 (жаростойкие, химически стойкие, радиационно-защитные, декоративные и др.).

5.6.1. Дорожный цементобетон

Дорожный цементобетон — разновидность тяжелого бетона, обладающая повышенной прочностью на растяжение при изгибе, износо- и морозостойкостью. Этот вид специального бетона применяют для устройства цементобетонных покры-

тий и оснований автомобильных дорог, взлетно-посадочных полос аэродромов, дорог промышленных предприятий.

Бетон в указанных дорожных конструкциях работает в тяжелых условиях. Он подвергается воздействию:

- многократно повторяющихся динамических нагрузок;
- воды;
- морозных циклов замораживания-оттаивания с одновременным влиянием солей, применяемых для борьбы с гололедом (NaCl).

Под действием транспортных нагрузок бетонное покрытие работает на изгиб как плита на упругом основании. Именно поэтому основным показателем механических свойств дорожного бетона является прочность на растяжение при изгибе. Прочность на сжатие для дорожных бетонов является косвенной характеристикой их износостойкости. Исследования показали, что при прочности на сжатие выше 30 МПа сопротивление истираемости дорожных покрытий будет достаточным (табл. 5.15).

Таблица 5.15

Рекомендуемые классы бетона по прочности для различных конструктивных слоев дорожных покрытий

Назначение бетона	Минимальный проектный класс, МПа (марка, кгс/см^2), бетона по прочности*	
	на растяжение при изгибе	на сжатие
Однослойное или верхний слой двухслойного покрытия дорог I и II категории	4,0 (50)	30 (400)
Нижний слой двухслойного покрытия дорог I и II категории	3,2 (40)	22,5 (300)
Однослойное или верхний слой двухслойного покрытия дорог III категории	3,6 (45)	27,5 (350)
Нижний слой двухслойного покрытия дорог III категории	2,8 (35)	20 (250)
Однослойное или верхний слой двухслойного покрытия дорог IV категории	3,2 (40)	25 (300)

Окончание табл. 5.15

Назначение бетона	Минимальный проектный класс, МПа (марка, кгс/см^2), бетона по прочности*	
	на растяжение при изгибе	на сжатие
Нижний слой двухслойного покрытия дорог IV категории	2,4 (30)	15 (200)
Основание дорог I–V категорий	1,2 (15)	5 (75)

*В скобках приведены значения ближайших к данному классу марок бетона для дорожных покрытий согласно Инструкции по строительству цементобетонных покрытий ВСН 139-80.

К важнейшим свойствам дорожного бетона относятся его деформативные свойства, характеризующие способность бетона деформироваться под действием нагрузки и температурно-влажностных факторов внешней среды.

Деформативные свойства бетона оцениваются значениями:

- модуля упругости ($2 \cdot 10^4$ МПа);
- коэффициента линейного температурного расширения (до $10 \cdot 10^{-6}$ на 1 °С);
- коэффициента Пуассона (0,18...0,22).

Эти характеристики (наряду с прочностью бетона на растяжение при изгибе) используются при расчете бетонных покрытий и оснований.

В технологии дорожных бетонов необходимо учитывать усадку, т.е. уменьшение их объема со временем в результате контракции цементного теста и потери им влаги в процессе твердения бетона. Под влиянием усадки поверхность бетонной плиты подвергается усадочным деформациям, существенно снижающим долговечность бетона. Наибольшее развитие усадочных деформаций приходится на первые часы и дни твердения бетона и при неблагоприятных условиях твердения может достигать 5...6 мм/м. Уменьшение В/Ц и содержания цемента в единице объема бетона, правильная разработка и осуществление операций по уходу за бетоном, направленных на предотвращение испарения из него влаги в начальный период твердения, способствуют уменьшению деформаций усадки.

Долговечность дорожного бетона по современным представлениям определяется его стойкостью к одновременно воздействующим на него агрессивным факторам и внешней нагрузке. Из агрессивных факторов наибольшее разрушающее действие на дорожный бетон оказывает циклическое замораживание и оттаивание в присутствии хлористых солей, применяемых при эксплуатации дорог для борьбы с гололедом. По действующим нормативным документам относительной оценкой долговечности дорожного бетона является марка по морозостойкости.

Морозостойкость бетона, его прочность и сопротивление поверхностному износу возрастают с уменьшением В/Ц.

Бетон однослойных покрытий и верхнего слоя двухслойных покрытий должен иметь высокую морозостойкость:

- в суровом климате (среднемесячная температура наиболее холодного месяца в году ниже −15°С) марка бетона по морозостойкости должна быть не ниже F200;
- в умеренном климате (температура −5...−15 °С) марка бетона F150;
- в мягком климате (температура 0...−5 °С) марка бетона F100.

Основной причиной разрушения бетона при воздействии солей и мороза является то, что на глубине 10...12 мм от поверхности происходит выкристаллизовывание льда и гидратов солей. Расширение льда, образующегося из растворов солей, составляет 1,5...3 % его первоначального объема, в то время как для пресного льда оно не превышает 0,1 %. На структуру льда влияет пространство, в котором он образуется, т.е. характер пористости бетона, которую следует регулировать добавками ПАВ. Повышение морозостойкости при применении ПАВ вызывается дополнительно вовлеченным воздухом. Пузырьки воздуха блокируют ходы сообщения между отдельными капиллярами, сеть которых оказывается разъединенной минерализованными пузырьками. Поры, образующиеся в бетонной смеси, не заполняются водой при увлажнении затвердевшего бетона и в качестве демпферного пространства воспринимают давление замерзшей воды.

Для снижения расхода цемента и улучшения свойств бетонной смеси и бетона дорожных и аэродромных покрытий, помимо воздухововлекающих добавок, необходимо применять пластифицирующие добавки. Наиболее широкое применение получила комплексная добавка, состоящая из лигносульфоната технического (ЛСТ, расход 0,15…0,25 %) и смолы нейтрализованной воздухововлекающей (СНВ, расход 0,001…0,025 %).

Требования к цементам и щебню. Для бетона дорожных и аэродромных покрытий применяют бездобавочные цементы ПЦ400 и ПЦ500, изготовленные на основе клинкера с содержанием $3CaO \cdot Al_2O_3 \leq 8$ % по массе. В качестве минеральной добавки допускается применять гранулированный шлак в количестве не более 15 %. Начало схватывания цемента должно наступать не ранее 2 ч.

Для бетона, применяемого в однослойном и верхнем слое двухслойного покрытия, *прочность* щебня из изверженных пород должна быть не менее 120 МПа, из осадочных пород — не менее 80 МПа. В бетоне для нижнего слоя двухслойных покрытий прочность щебня из изверженных пород должна составлять не менее 80 МПа, щебня из осадочных пород — более 60 МПа.

Использование активированного (свежедробленого) щебня позволяет получить бетон с более высокой прочностью на растяжение при изгибе.

Наибольший размер зерен щебня или гравия должен быть не более:

- для верхнего слоя двухслойных покрытий — 20 мм;
- для однослойных и нижнего слоя двухслойных покрытий — 40 мм;
- для оснований — 70 мм.

Морозостойкость щебня из плотных горных пород и гравия для однослойных и верхнего слоя двухслойных покрытий, в зависимости от климатических условий, должна быть меньше морозостойкости бетона.

Требования к удобоукладываемости и продолжительности транспортирования бетонной смеси (в открытых автосамосвалах). На качество уплотнения бетонной смеси в покрытии, а следовательно, и на свойства бетона оказывает влияние удо-

боукладываемость смеси на месте бетонирования. В зависимости от способа уплотнения удобоукладываемость нормируется ГОСТ 10181.1–81 (табл. 5.16).

Таблица 5.16

Назначение удобоукладываемости бетонной смеси в зависимости от вида машинного уплотнения

Машины и оборудование для уплотнения бетонной смеси в покрытии (основании)	Удобоукладываемость	
	Подвижность, см, не более	Жесткость, с, не менее
Бетоноукладчик на колесно-рельсовом ходу (в рельс-формах)	2	8
Бетоноукладчик со скользящей опалубкой при скорости движения, м/мин:		
2 и менее	2	10
2...2,5	3	5
2,5...3,0	4	—
Площадочный вибратор и виброрейки	4	—
Вибрационные катки и другое аналогичное оборудование	—	30

Продолжительность транспортирования бетонной смеси не должна превышать 30 мин при температуре воздуха 20...30 °С и 60 мин при температуре воздуха ниже 20 °С .

5.6.2. Гидротехнический бетон

Гидротехнический бетон — это плотный тяжелый бетон, применяющийся для строительства сооружений, которые постоянно или периодически омываются водой (плотины, шлюзы, каналы, набережные, мелиоративные сооружения).

К такому бетону, помимо требований к прочности, предъявляют жесткие требования по водонепроницаемости, водостойкости, устойчивости к образованию трещин при экзотермии и усадке, морозостойкости и долговечности.

В зависимости от расположения в гидротехническом сооружении различают бетон:

- *подводный* (постоянно находится в воде);
- *надводный* (располагается в зоне переменного горизонта воды и подвергается лишь периодическому ее воздействию).

В самых тяжелых условиях находится бетон в зоне переменного уровня воды, где он подвергается многократному замерзанию-оттаиванию, воздействию ударных и истирающих механических нагрузок.

Для гидротехнического бетона установлены следующие требования:

- классы по прочности на сжатие: В7,5; В10; В15; В20; В25; В30; В35; В40;
- марки по водонепроницаемости в возрасте 180 сут.: W2...W8;
- марки по морозостойкости: F50, F100, F150, F200, F300, F400, F500.

Прочность на сжатие и осевое растяжение определяют для различных гидротехнических сооружений в возрасте 180 сут., для морских — 28 сут.

Разрешается устанавливать прочность на образцах:

- при сокращении сроков строительства — в возрасте 90 сут.;
- при применении сборного железобетона — 60 сут.;
- при зимнем бетонировании — 28 сут.

Водопоглощение бетона зоны переменного уровня воды не должно превышать 5 % массы высушенных образцов в возрасте 28 сут., для бетона других зон — не более 7 %.

Линейная усадка бетона при относительной влажности воздуха 60 % и температуре 20 °С в возрасте 28 сут. не должна превышать 0,3 мм/м, в возрасте 180 сут. — 0,7 мм/м.

Для этого вида бетона установлены значения В/Ц в пределах 0,45...0,6.

При изготовлении бетонов для сооружений, расположенных на уровне переменного горизонта воды, применяют сульфатостойкий и пластифицированный портландцементы с ограниченным количеством минеральных добавок, а также морозостойкие заполнители из изверженных и осадочных пород; для бетона подводных сооружений в зависимости от агрессивности воды — сульфатостойкий или пуццолановый портландцемент.

Содержание $3CaO \cdot Al_2O_3$ в цементе для гидротехнического бетона не должно превышать 3...5 %, а сумма $3CaO \cdot Al_2O_3 + 4CaO \cdot Al_2O_3Fe_2O_3$ должна быть не менее 20 %.

Расход цемента по условиям тепловыделения должен быть не более 350 кг/м^3 для массивных конструкций и не более 400 кг/м^3 для немассивных.

5.6.3. Жаростойкие бетоны

Жаростойкие бетоны предназначены для применения в конструкциях, работающих при температуре от 200 до 1800 °С в течение длительного времени. Примерами таких конструкций могут служить дымовые трубы; футеровки печей и котлов; фундаменты тепловых агрегатов.

Изготавливают такие бетоны в соответствии с требованиями ГОСТ 20910–82.

При воздействии высоких температур на затвердевший портландцемент происходит разложение компонентов цементного камня (гидросиликатов и гидроалюминатов кальция, а также гидроксида кальция). Такие процессы приводят к образованию свободного CaO. Его наличие в затвердевшем материале опасно тем, что при воздействии влаги он гидратируется с увеличением в объеме, стимулируя трещинообразование и разрушение конструкции. Поэтому в состав жаростойкого бетона на основе портландцемента вводят тонкомолотые добавки, содержащие активный аморфный кремнезем, который способен связывать оксид кальция при температуре 700...900 °С. В качестве таких добавок применяют молотые шамот, золошлак, керамзит, аглопорит, магнезит и др.

Заполнителями для жаропрочных бетонов могут служить шамот, шлаки, базальт, андезит, диорит, керамзит, аглопорит, бой жаростойкого бетона, бой огнеупорного кирпича и др.

В качестве связующего могут использоваться портландцемент и его разновидности (быстротвердеющий портландцемент, шлакопортландцемент), алюминатные цементы (глиноземистый и высокоглиноземистый), силикатные вяжущие (жидкое стекло с отвердителем).

Тип вяжущего и заполнители выбираются с учетом температуры эксплуатации конструкции.

Для жаростойких бетонов установлены классы по прочности на сжатие от В1 до В40 и классы по предельно допустимой температуре от 300 до 1800 °С.

5.6.4. Химически стойкие бетоны

Химически стойкие бетоны используют для изготовления различных видов конструкций и облицовки аппаратуры в химической промышленности, заменяя ими кислотоупорную керамику и другие дорогостоящие материалы. Изготовляемые конструкции на основе этих бетонов работают в агрессивных средах: минеральных и органических кислотах, растворах солей, растворителях и нефтепродуктах.

Химически стойкие бетоны подразделяются:

- на *полимерные* —на основе специальных вяжущих с использованием фурановых, эпоксидных, карбомидных, акриловых синтетических смол;
- *полимерсиликатные* — на основе жидкого натриевого или калиевого стекла с полимерной отверждающей добавкой.

Для снижения расхода дорогостоящих смол в состав бетонных смесей вводят химически стойкие наполнители (кварцевую или андезитовую муку и др.).

В качестве заполнителей применяют гранитный щебень, кварцевый песок и другие материалы, стойкие к воздействию указанных агрессивных сред.

Критерием оценки химической стойкости бетонов является коэффициент химической стойкости:

$$K_{х.с} = \frac{R_\tau}{R_о}, \qquad (5.31)$$

где R_τ — предел прочности серии образцов на растяжение при изгибе после выдержки их в агрессивной среде в течение 360 сут. (при промежуточных сроках 30, 60, 90, 270 сут.); $R_о$ — предел прочности серии образцов на растяжение при изгибе, не погружавшихся в агрессивную среду (контрольные образцы).

В зависимости от стойкости в агрессивных средах бетоны подразделяются:

- на высокостойкие — $K_{х.с} \geq 0{,}8$;
- стойкие — $0{,}5 \leq K_{х.с} < 0{,}8$;
- относительно стойкие — $0{,}3 \leq K_{х.с} < 0{,}5$;
- нестойкие — $K_{х.с} < 0{,}3$.

Прочность на сжатие химически стойких бетонов составляет 30…110 МПа, морозостойкость — 300…1000 циклов.

5.6.5. Радиационно-защитные бетоны

Радиационно-защитные бетоны предназначены для надежной защиты персонала и окружающей среды от радиоактивных излучений (рентгеновских, γ-, α- и β-лучей) ядерных реакторов АЭС, предприятий по выработке и переработке изотопов и др.

Для защиты от воздействий нейтронных потоков наиболее эффективно применение *гидратных бетонов*, т.е. бетонов с повышенным содержанием (более 3 % по массе) химически связанной воды, а следовательно, и ядер водорода (водород, обладая малой молекулярной массой, способствует захвату потока нейтронов).

Для гидратных бетонов применяют глиноземистый, расширяющийся, быстротвердеющий, самонапрягаемый цементы.

Указанные цементы в той или иной мере способствуют максимальному химическому и адсорбционному удержанию воды в цементном камне, а следовательно, и получению в нем ядер водорода.

В качестве радиационно-защитных материалов наиболее широко применяют *особо тяжелые бетоны* с высокой плотностью (2500...6000 кг/м^3), достигаемой за счет использования тяжелых заполнителей: магнетита, лимонита, барита, металлического скрапа в виде чугунной дроби, металлических стружек и др. В качестве вяжущих веществ в особо тяжелых бетонах применяют: портландцемент, шлакопортландцемент, глиноземистый цемент, гипсоглиноземистый (расширяющийся) цемент.

Радиационно-защитные бетоны характеризуются:

- средней плотностью бетона;
- фактическим содержанием химически связанной воды;
- толщиной слоя бетона, способного ослабить поток излучения в два раза по сравнению с первоначальным.

5.6.6. Декоративные бетоны

Декоративные (цветные) бетоны применяют для элементов фасада зданий, переходных (пешеходных) полос на улицах и дорогах, для обозначения разделительных и краевых полос.

Декоративный бетон готовят с использованием белых и цветных цементов и различных пигментов, которые должны обладать высокой свето-, атмосферо- и щелочестойкостью. Чаще применяют минеральные пигменты, являющиеся оксидами или солями различных металлов.

В цветных бетонах применяют кварцевые пески светлых оттенков, дробленые пески и щебень из мрамора.

Для формования изделий из цветного бетона используют подвижные жирные бетонные смеси с расходом цемента 450…500 кг/м^3, которые менее подвержены расслоению.

Содержание воды в бетонной смеси должно приближаться к нормальной густоте цементного теста, поэтому для сокращения расхода воды и повышения долговечности изделий используют пластификаторы и суперпластификаторы.

Для сохранения внешнего вида поверхности декоративного бетона в течение длительного времени применяют различные способы ее обработки (флюатирование, гидрофобизацию, пропитку полимером).

5.6.7. Бетон «сухого» формования

Сухие бетонные смеси, как цементно-песчаные, так и трехкомпонентные (содержащие крупный заполнитель), могут быть использованы для получения конструкционного бетона по нетрадиционной технологии «сухого» формования, разработанной в Белорусском национальном техническом университете (Э.И. Батяновский). В этом случае в опалубке, форме или матрице формующего устройства уплотняют сухую бетонную смесь, а затем к ней разнообразными приемами подводят воду либо водные растворы химических добавок для обеспечения реакций гидратации цемента. Разработан вариант влагонасыщения сухих смесей нагнетанием водяного пара под давлением, чем обеспечивается одновременный разогрев бетона,

даже если сухая смесь была охлаждена до отрицательной температуры.

Дополнительная обработка особо плотного бетона заключается в его повторном вибрировании с пригрузом после влагонасыщения сухой бетонной смеси. При этом устраняются дефекты структуры цементного камня, возникающие в виде каналов фильтрации жидкости под давлением, повышается качество сцепления цементного камня с заполнителями. Кроме того, вибрация водонасыщенной смеси вызывает активизацию вяжущих свойств цемента.

Характерной особенностью бетона «сухого» формования является его схватывание в процессе влагонасыщения вследствие низкого водоцементного отношения (0,25...0,30) и значительной плотности укладки зерен твердой фазы ($\rho_o \approx 2500$ кг/м^3).

Прочность свежеотформованного повторно вибрированного бетона — до 2 МПа; за 12...24 ч твердения бетон «сухого» формования на рядовых цементах с расходом 360...380 кг/м^3 достигает прочности 15...50 МПа в зависимости от температурного режима выдержки.

Технологию «сухого» формования с водонасыщением и повторным вибрированием целесообразно использовать для мелкоштучных изделий с повышенными прочностными характеристиками и эксплуатационной надежностью (разнообразных элементов благоустройства, дорожных плит, элементов обделки тоннелей метро и др.).

5.6.8. Бетоны полимерсерные (полимербетоны)

Полимерсерные бетоны представляют собой искусственный камневидный материал, получаемый на основе технической серы, полимерных добавок и минеральных заполнителей и наполнителей без участия минеральных вяжущих и воды. Функцию вяжущего в таких бетонах выполняет расплавленная техническая сера с полимерными добавками (хлорпарафин, стирол и др.) в количестве 1...5 %. В ряде случаев вместо технической серы в полимерсерном бетоне используют серосодержащие отходы (ССО): золы отстоя (до 70 % серы) и хвосты отстоя (до 40 % серы).

В качестве заполнителей в таких бетонах применяют щебень горных пород различных фракций, кварцевые пески, андезитовую муку, маршалит с удельной поверхностью 2500…3000 $см^2/г$.

Технология получения полимерсерных бетонов простая: серу или ССО расплавляют совместно с полимерными добавками и наполнителем при температуре 150 °С, а затем в обогреваемом бетоносмесителе принудительного действия перемешивают с заполнителями. Готовую смесь виброформуют в металлических формах.

В зависимости от вида заполнителей полимерсерные бетоны подразделяют по плотности:

- на тяжелые (2300…2500 $кг/м^3$), прочность на сжатие 60…80 МПа, прочность на растяжение при изгибе 12…13 МПа;
- легкие (800…1600 $кг/м^3$), прочность на сжатие 50…60 МПа, прочность на растяжение при изгибе 10…11 МПа;
- теплоизоляционные (300…400 $кг/м^3$).

Положительные свойства полимерсерных бетонов:

- быстрый набор прочности;
- низкое водопоглощение (0,05…0,07 % за 24 ч);
- возможность армирования серобетонных конструкций стальной или стеклопластиковой арматурой;
- химическая стойкость к агрессивным средам;
- сравнительно невысокая стоимость.

Все эти качества позволяют их применять для изготовления дорожных и тротуарных плит, бордюрных камней, химически стойких полов на складах минеральных удобрений, силосных башен для хранения химически агрессивных материалов, ремонта аэродромных плит.

Близким к полимерсерным бетонам является *серный бетон*, в котором отсутствуют полимерные добавки. Это искусственный композиционный материал, представляющий собой отформованную затвердевшую смесь, состоящую из серного вяжущего (20…35 %) и заполнителей (65…80 %). Приготовление смеси и формовку изделий производят при температуре 140±10 °С.

5.7. Легкие бетоны

Легкий бетон — искусственный каменный материал со средней плотностью в сухом состоянии не выше 2000 кг/м^3. Снижения его массы достигают в основном за счет применения пористых заполнителей, иногда — путем поризации вяжущего.

Легкие бетоны нашли широкое применение в промышленно-гражданском (перекрытие больших пролетов, улучшение теплотехнических и акустических свойств зданий) и транспортном строительстве (облегчение массы пролетных строений мостовых конструкций).

Снижение плотности легких бетонов обеспечивается за счет использования пористых заполнителей природного происхождения (туфы, пемзы, известняк-ракушечник и др.) и искусственных (керамзит, аглопорит, шлаковая пемза и др.). Поэтому к легким бетонам, наряду с требованиями по прочности, предъявляются определенные требования по плотности.

Марка бетона (кг/м^3) по средней плотности определяется в сухом состоянии и обозначается буквой D (например, D500 соответствует средней плотности 500 кг/м^3).

В зависимости от прочности на сжатие легкие бетоны подразделяют на три группы:

- теплоизоляционные (B0,35…B2; D200…D500);
- конструкционно-теплоизоляционные (B2,5…B10; D600 и более);
- конструкционные (B12,5…B40; D1100… D2000).

Свойства легких бетонов определяют область их применения.

Теплоизоляционные бетоны используются в многослойных конструкциях. Они предназначены для теплоизоляции ограждающих строительных конструкций, трубопроводов и тепловых агрегатов.Основное требование к таким бетонам — величина средней плотности.

Конструкционно-теплоизоляционные бетоны применяются в ограждающих конструкциях и должны обеспечивать как требуемую плотность, так и прочность.

Конструкционные бетоны используются для несущих конструкций. Основное требование к ним — достаточно высокая прочность (требования по теплопроводности не учитывают).

По структуре легкие бетоны подразделяют:

- на обычные на пористых заполнителях — в них раствор на плотном или пористом песке полностью заполняет межзерновые пустоты в крупном заполнителе;
- поризованные — в них растворная часть поризуется специальными добавками и обеспечивает заполнение межзерновых пустот в крупном заполнителе;
- крупнопористые — в них отсутствует песок и сохраняются межзерновые пустоты в крупном заполнителе.

В зависимости от вида пористого заполнителя легкие бетоны получили соответствующие названия: керамзитобетон, аглопоритобетон, вермикулитобетон, перлитобетон и др.

Легкие бетоны на пористых заполнителях имеют марки: по водонепроницаемости — от W2 до W12; по морозостойкости — от F25 до F500.

Легкие бетоны характеризуются пониженной теплопроводностью.

Деформативные свойства легких бетонов выше, чем тяжелых. Предельная растяжимость примерно в два раза больше, чем у тяжелых бетонов, что обеспечивает более высокую трещиностойкость.

Среди легких бетонов с пористым заполнителем наибольшее распространение получил *керамзитобетон*. В нем заполнителем является керамзит, а вяжущим — цемент, гипс или синтетические смолы. В зависимости от плотности и прочности он может быть теплоизоляционным, конструкционно-теплоизоляционным и конструкционным.

К легким бетонам относятся также *ячеистые бетоны*, отличающиеся высокой пористостью и отсутствием крупных заполнителей. Его ячеистая структура представлена большим количеством равномерно распределенных замкнутых пор размером 0,5...2 мм, разделенных тонкими прочными перегородками из отвердевшего цементного камня, которые образуют несущий каркас.

В зависимости от способа получения ячеистые бетоны подразделяются на пено- и газобетоны.

Пенобетоны получают смешиванием цементного (известкового) теста или цементного (известкового) раствора с устойчивой пеной, которую готовят взбиванием жидкой смеси канифольного мыла и животного клея или водного раствора сапонина. Полученная пена имеет устойчивую структуру, хорошо перемешивается с цементным (известковым) тестом или их растворами. Смесь после затвердевания образует бетон ячеистой структуры.

Пенобетон готовят в стационарных пенобетоносмесителях с принудительным перемешиванием смеси. Готовую смесь подают в раздаточный бункер, а оттуда в формы.

Вместо портландцемента в ячеистом бетоне часто используют известь, и тогда бетон называют *газосиликатом*.

Преимущественное распространение в строительстве получили *газобетон* и *газосиликат*. В качестве газообразователя в них используют тонкоизмельченный алюминиевый порошок (алюминиевую пудру). Вступая в химическую реакцию с гидроксидом кальция, он способствует выделению молекул водорода:

$$3Ca(OH)_2 + 2Al + 6H_2O = 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 3H_2.$$

Выделяемый водород частично теряется при перемешивании компонентов газобетона, но большая его часть (до 70...85 %), расширяясь, вспучивает цементное тесто. Ячеистое цементное тесто затвердевает, образуя высокопористую матричную часть этого конгломератного материала. Чтобы процесс вспучивания протекал интенсивнее, к портландцементу добавляют некоторое количество извести-пушонки (примерно 10 % его массы).

Быстрая укладка смеси в металлические формы приводит к тому, что процесс газообразования происходит в основном в период нахождения смеси в этих формах и продолжается примерно 15...20 мин. Важно, чтобы к моменту завершения процесса выделения водорода бетонная смесь загустела и смогла зафиксировать ячеистую структуру матричной части бетона.

Другим газообразователем может служить пергидроль (техническая перекись водорода). В щелочной среде цемент-

ного теста или цементного раствора пергидроль разлагается с выделением молекул кислорода:

$$2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2.$$

Молекулы кислорода вспучивают цементное тесто и строительный раствор в течение 7...10 мин, что позволяет получить газобетон средней плотности до 1200 кг/м^3.

Исследования показали, что совместное применение пергидроля и хлорной извести оказывает положительное влияние на образование макроструктуры ячеистых бетонов.

Повышению однородности распределения пористости способствует кратковременная (до 20 с) обработка компонентов ячеистобетонных смесей в электромагнитном поле, особенно в присутствии магнитоактивных добавок, (например, пиритных огарков, ферросилиция).

Физико-механические свойства ячеистых бетонов характеризуются маркой по пределу прочности на сжатие образцов-кубов с ребром 150 мм при влажности их 10±2 % по массе и 28-суточном твердении в нормальных температурно-влажностных условиях хранения (М15, 25, 35, 50, 75, 100, 150) или, согласно ГОСТ 25485–82, классами (В1; В1,5; В2; В2,5; В3,5; В5; В7,5; В10) и маркой по морозостойкости (F15, 25, 50, 75, 100). Для разных целей применяют бетоны с различной прочностью и морозостойкостью. Так, например, конструкционные ячеистые бетоны должны иметь марку по прочности не менее 75 (класс не ниже В5), а по морозостойкости — не менее 50.

5.8. Железобетонные изделия

Железобетон — комплексный строительный материал, в котором соединены бетон и стальная арматура, работающие в конструкции как единое целое. Гармоничная совместная работа таких различных по структуре составляющих обеспечивается прочным сцеплением бетона с арматурой и относительно близкими значениями температурных коэффициентов линейного расширения обоих материалов (в пределах 0...80 °С).

Бетоном хорошо воспринимаются сжимающие усилия, а на растяжение он работает плохо. Прочность бетона на растяжение составляет 5...10 % от прочности на сжатие. Предельная деформативность (растяжение) бетона примерно в 10 раз меньше его предельной сжимаемости. Такая особенность свойств бетона делает его применение в конструкциях, работающих на изгиб и растяжение, малоэффективным, а в большинстве случаев просто невозможным.

Стальная арматура эффективно сопротивляется растягивающим усилиям. Поэтому арматуру (стальные стержни, сетки, каркасы) располагают в бетоне так, чтобы возникающие в железобетонной конструкции растягивающие усилия воспринимались арматурой, а сжимающие усилия передавались на бетон.

Широкое применение железобетона объясняется его достоинствами:

- он обладает высокой прочностью и долговечностью;
- формообразование изделий из него сравнительно простое.

Железобетон применяют в дорожном строительстве, гидротехнических сооружениях, в зданиях и сооружениях различного назначения.

Железобетонные конструкции подразделяют на монолитные и сборные. *Монолитные* железобетонные конструкции бетонируют на месте строительства, *сборные* — монтируют на заводах или полигонах. Широкое применение сборного железобетона в строительстве объясняется тем, что это позволяет:

- экономить металл;
- сокращать расход лесных материалов (отпадает необходимость устройства лесов, подмостей и опалубки);
- повысить производительность труда и темпов строительства, что снижает его стоимость;
- значительно упростить производство работ в зимний период.

5.8.1. Арматура

В железобетонном изделии основную роль играет ***стальная арматура***.

Арматуру для железобетонных конструкций изготовляют из углеродистых и низколегированных сталей (содержание легирующих добавок не более 2,5 %) в виде стержней, проволоки гладкого и периодического профиля, а также различных сеток (рис. 5.17). Кроме того, в конструкциях устанавливаются закладные детали для соединения их при монтаже и петли для транспортировки и монтажа. Основным нормируемым

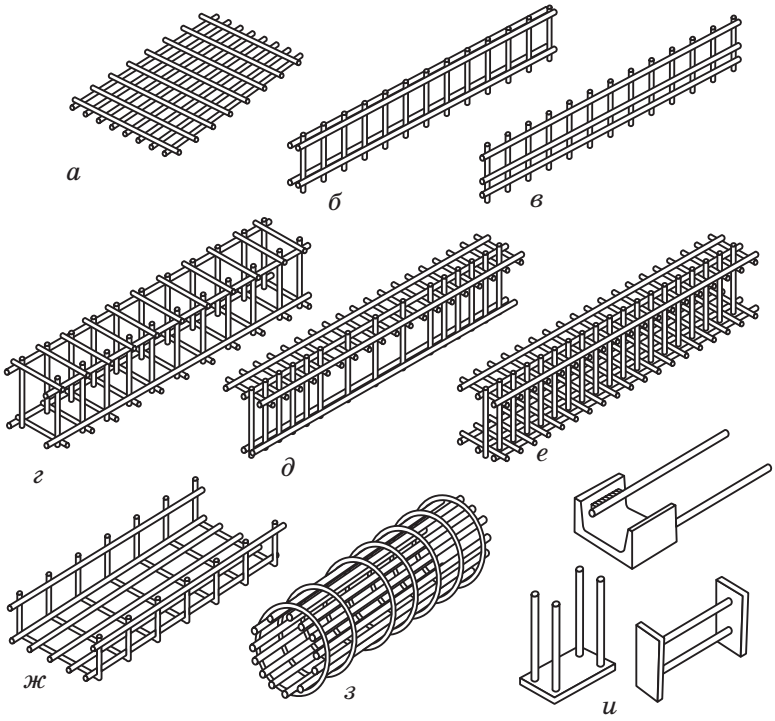


Рис. 5.17. Арматурные изделия заводского изготовления: *а* — плоская сетка; *б*, *в* — плоские каркасы; *г* — пространственный каркас; *д* — пространственный каркас таврового сечения; *е* — пространственный каркас двутаврового сечения; *ж* — гнутая сетка; *з* — гнутая сетка криволинейного сечения; *и* — закладные детали

показателем механических свойств стали является класс арматуры по прочности на растяжение.

Арматурная сталь по способу производства подразделяется:

- на горячекатаную (А), диаметром 6...80 мм;
- термомеханически упрочненную ($А_т$), диаметром 6...40 мм;
- холоднотянутую (В, $В_р$), диаметром 3...12 мм.

Для обычных сборных железобетонных конструкций наиболее широко применяют ***бетон*** марок М200 и М300, а для предварительно-напряженных — М400 и выше. Вяжущими материалами служат портландцемент и другие цементы; наиболее эффективны для сборного железобетона высокопрочные и быстротвердеющие портландцементы. Использование для сборного железобетона высокопрочного быстротвердеющего цемента позволяет значительно уменьшить время на его тепловлажностную обработку.

К бетону в железобетонных конструкциях предъявляют два дополнительных требования: обеспечение сцепления с арматурой и защита от коррозии. Сцепление бетона с арматурой зависит от прочности бетона и адгезионных свойств цементного камня (адгезия — сцепление поверхности разнородных материалов). Примерная величина прочности сцепления тяжелого цементного бетона с гладкой арматурой составляет (0,15...0,20) $R_{сж}^{28}$. Прочность сцепления значительно возрастает при использовании арматуры с периодическим профилем, так как при этом увеличивается поверхность контакта и дополнительно включается зацепление бетона между выступами на арматурном стержне (рис. 5.18).

Долговременная совместная работа бетона с арматурой возможна, если арматура не подвергается коррозионному разрушению под действием внешней среды. В цементных бетонах монолитного строения на плотных и пористых заполнителях создается среда с высокой щелочностью — так называемая поровая жидкость бетона. В этих условиях на поверхности арматуры образуется защитная пленка, которая препятствует развитию коррозии и обеспечивает сохранность арматуры в бетоне. Для обеспечения защиты арматуры от коррозии в конструкциях всегда имеется защитный слой бетона толщиной 15...30 мм.

В ячеистых бетонах с высокой пористостью структуры ар-

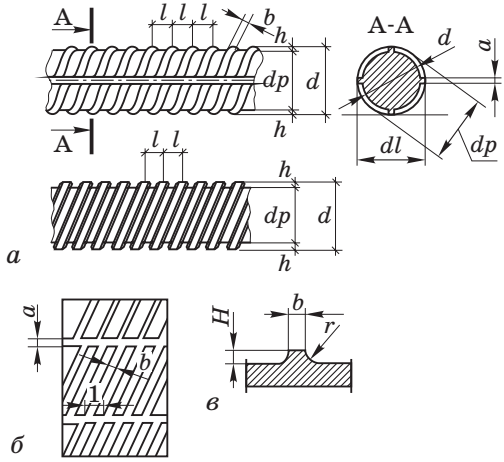


Рис. 5.18. Арматурная сталь периодического профиля: *а* — общий вид стержня; *б* — развернутая поверхность; *в* — деталь винтового выступа

матуру необходимо защищать специальными антикоррозионными покрытиями.

По способу использования арматуры конструкции подразделяются на конструкции с обычным армированием и предварительно напряженные. В *конструкциях с обычной* (*ненапрягаемой*) *арматурой* стальная арматура располагается свободно в растянутой зоне конструкции. Такой способ армирования не предотвращает полностью образования трещин в бетоне, так как растяжимость бетона в 5–6 раз меньше растяжимости стали. При этом прочность арматуры недоиспользуется, а возможное образование трещин может привести к коррозии стальной арматуры под действием кислых газов или растворов кислот и других веществ, агрессивных по отношению к арматуре.

В *предварительно напряженных конструкциях* арматуру предварительно растягивают, закрепляют в таком положении, а затем бетонируют. После затвердевания бетона арматуру освобождают от закрепления. При этом она стремится сократиться, бетон оказывает сопротивление и в нем возникают сжимающие напряжения — происходит обжатие бетона в растянутой зоне конструкции (рис. 5.19).

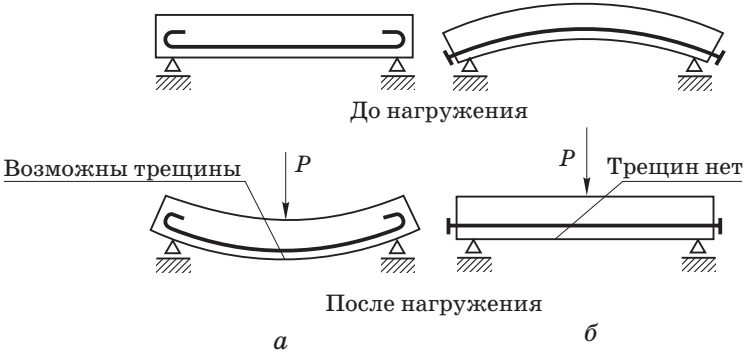


Рис. 5.19. Работа железобетонной балки на изгиб: *а* — с обычной арматурой; *б* — с предварительно напряженной арматурой

Обжатие улучшает работу бетона на растяжение и изгиб, так как сжимающие усилия, возникающие в нем в процессе передачи напряжения арматуры на бетон, при приложении внешней нагрузки компенсируются растягивающими. Предварительное натяжение при применении высокопрочной арматуры и полном использовании ее несущей способности позволяет достигнуть экономии металла до 40 %.

Напряжение арматуры производят до или после бетонирования изделий механическим или электротермическим способом.

При напряжении арматуры механическим способом до бетонирования уложенную в форму арматуру с одного конца закрепляют на упоре, а с другого с помощью специальных приспособлений растягивают, не доводя до предела текучести. Затем форму заполняют бетонной смесью. После набора бетоном необходимой прочности (порядка 30 МПа) арматуру освобождают от натяжения. Стремясь возвратиться в свое первоначальное состояние, она укорачивается и обжимает бетон. При этом в железобетонной конструкции возникают сжимающие усилия, которые компенсируют растягивающие усилия от внешней нагрузки. Этим повышается жесткость железобетонных изгибаемых конструкций и отдаляется начало образования трещин в бетоне.

При напряжении арматуры после бетонирования в конструкции при изготовлении оставляют сквозные каналы, че-

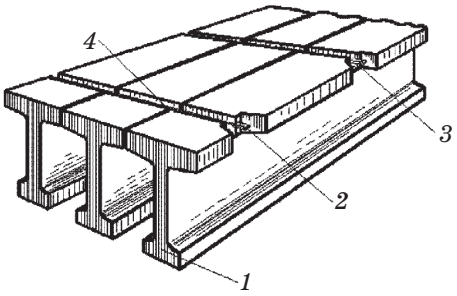


Рис. 5.20. Балки пролетных строений моста с арматурой, напрягаемой после бетонирования:
1 — балка; *2* — напрягаемый стержень; *3* — анкерные коротыши; *4* — открытые каналы

рез которые протаскивают арматуру (рис. 5.20). Напряженную арматуру закрепляют на концах конструкций анкерующими устройствами.

Напряжение арматуры электротермическим способом показано на рис. 5.21.

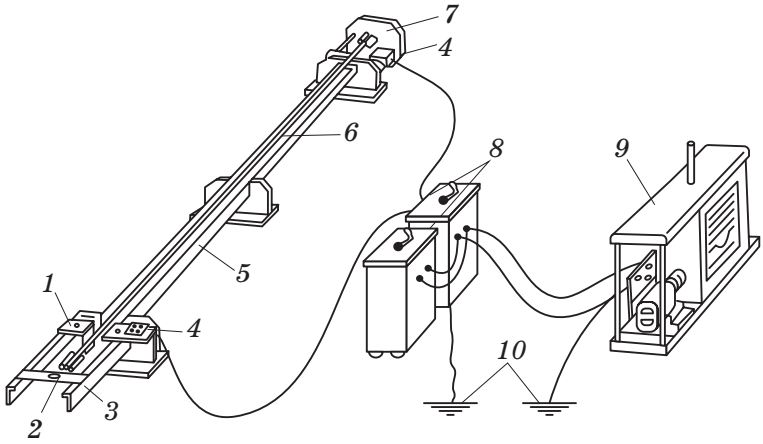


Рис. 5.21. Схема напряжения стержней арматуры методом электрического нагрева:
1 — медные шины; *2* — сигнальная кнопка; *3* — планка передвижной каретки; *4* — зажимы кабеля; *5* — желоб; *6* — нагреваемый стержень; *7* — упор; *8* — сварочные трансформаторы; *9* — передвижная электростанция; *10* — заземление

5.8.2. Изделия из железобетона

По назначению сборные железобетонные изделия можно условно разделить на группы:

- для дорожного строительства;
- для гражданских, общественных и административных зданий;
- для гидротехнического строительства;
- общего назначения.

Изделия и конструкции для дорожного строительства (рис. 5.22): плиты для устройства дорожных оснований и покрытий, тротуаров, полос уширения, для укрепления откосов; надолбы; столбы для указательных знаков, километровые столбы; звенья труб; блоки фундаментов под водопропускные трубы; мостовые опоры; сваи; балки пролетных строений мо-

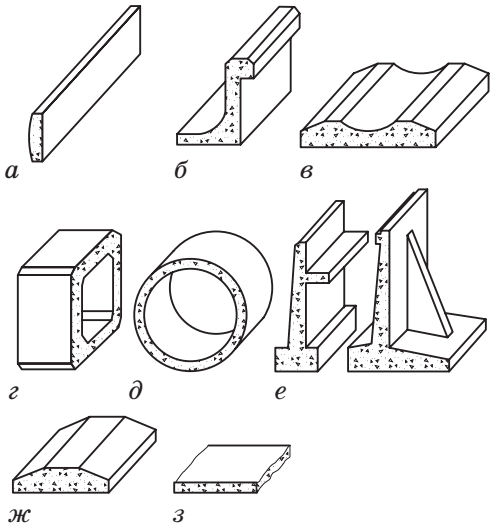


Рис. 5.22. Изделия и конструкции из железобетона, применяемые в дорожном строительстве:
а — колесоотбойный брус; *б* — колесоотбойная бортовая панель; *в* — блок фундамента под трубу; *г* — звено прямоугольной дорожной трубы; *д* — звено круглой дорожной трубы; *е* — элементы подпорных стенок; *ж* — фундаментный блок; *з* — плита для дорожного покрытия

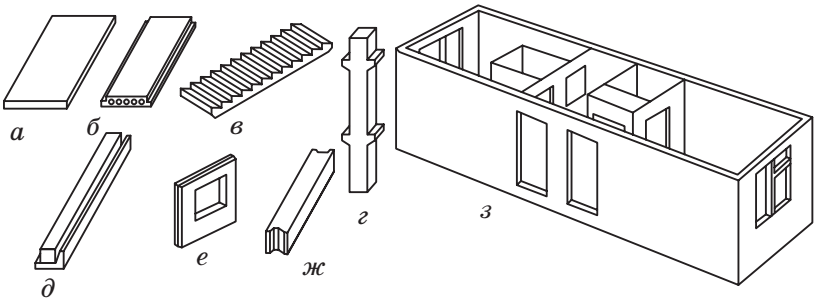


Рис. 5.23. Основные типы железобетонных изделий для жилищного и гражданского строительства:
а — панель перекрытия сплошная; *б* — панель перекрытия с круглыми пустотами; *в* — лестничный марш; *г* — колонна; *д* — ригель; *е* — наружная стеновая панель; *ж* — фундаментный блок; *з* — объемный элемент блок-комнат

стов, тротуарные блоки, детали и конструкции для устройства тоннелей, перильные ограждения и др.

Изделия и конструкции для гражданских, общественных и административных зданий: фундаментные плиты и блоки, колонны одноэтажных зданий, балки покрытий, стеновые панели и блоки, элементы междуэтажных перекрытий, элементы сборных лестниц, блоки квартир, санитарно-технические изделия, фермы и арки и др. (рис. 5.23).

Изделия для гидротехнического строительства: балки и балочные плиты перекрытий для водосливных поверхностей плотин, сваи, плиты ростверков и кордонных балок эстакад морских портов, фундаментные блоки и плиты, элементы для устройства речных набережных, блоки для волноломов и молов, другие сборные элементы гидротехнических и мелиоративных сооружений.

Изделия и конструкции общего назначения: водопроводные и канализационные трубы, коллекторы, смотровые колодцы, опоры линий связи, электропередачи и освещения, железнодорожные шпалы, детали оград, хранилища жидких и сыпучих материалов, силосные сооружения, подпорные стенки и т.д.

5.8.3. Производство бетонных и железобетонных изделий

Сборные железобетонные конструкции изготовляют на заводах сборного железобетона. На заводе могут также производиться укомплектование и сборка деталей и конструкций.

Производство сборного железобетона состоит из следующих основных технологических процессов:

- приготовление бетонной смеси;
- изготовление арматурных элементов;
- формование изделий, включая армирование;
- тепловая обработка отформованных изделий.

Технология получения бетонных изделий (бортового камня, тротуарной плитки, оголовков труб и т.д.) несколько проще, так как их не требуется армировать.

Способы формования изделий. В настоящее время сборные бетонные и железобетонные конструкции изготовляют по трем схемам, определяющим признаком которых является способ формования.

1) стендовый (разновидность — кассетный);
2) поточный;
3) конвейерный.

Стендовый способ. При изготовлении изделий в неперемещаемых формах все технологические операции (установка опалубки, арматуры, заполнение бетонной смесью, ее уплотнение, твердение, извлечение готовых изделий) выполняются на одном месте. Такой способ применяется при изготовлении массивных конструкций, например пролетных строений мостов, ферм, арок и плит для дорожных и аэродромных покрытий и др. К этому же способу относят формование изделий и конструкций на плоских стендах в кассетах.

При стендовом способе перемещается только технологическое оборудование для выполнения отдельных операций (в порядке, предусмотренном технологией производства работ). Изделие остается на одном месте (стенде). Для улучшения использования площади цеха целесообразно изготовлять однотипные изделия в формах, размещаемых вдоль формовочной полосы, с выполнением операций по армированию и формованию одновременно во всех формах.

Длинномерные детали рекомендуется формовать в вертикальном положении, а для изготовления однотипных тонкостенных деталей (плит) — применять *кассеты*. При кассетном способе весь технологический цикл ведется в неподвижной вертикальной форме-кассете, которая имеет ряд отсеков. В результате уменьшается потребность в производственных площадях и повышается производительность труда. Кассетным способом выгодно изготовлять различные плиты, бортовой камень, балки и т.д.

В зависимости от длины различают стенды длинные (80...150 м) и короткие (20...40 м). Преимуществом длинных стендов является укрупнение объемов работ и лучшее использование механизмов. В ряде случаев целесообразно применять короткие стенды на одно или два крупноразмерных изделия — этим можно увеличить оборачиваемость стендов за счет сокращения длительности производственного цикла.

Чаще всего стендовый способ используют при производстве изделий и конструкций на полигонах, где производственные площади не ограничены.

В некоторых дорожных и мостостроительных организациях имеются небольшие полигоны с пропарочными камерами, где изготавливают мелкие бетонные и железобетонные изделия: бортовые камни, фундаментные блоки под водопропускные трубы, столбы для километровых и указательных знаков, перильные ограждения для небольших мостов, тротуарные плитки и т.д.

Выпуск свай, пролетных строений мостов, водопропускных труб большого диаметра осуществляют крупные заводы бетонных и железобетонных изделий.

Поточный способ. Изготовление изделий и конструкций в перемещаемых формах называют поточным способом. При таком методе производства изделия перемещаются от одного рабочего поста к другому. За каждым постом закреплено соответствующее оборудование и обслуживающий персонал.

Изготовление изделий по поточному способу осуществляется на конвейерах или агрегатно-поточных линиях.

Конвейерный способ. Конвейерная технологическая линия имеет две разновидности:

- тележечная;
- ленточная.

Тележечный конвейер состоит из форм-вагонеток, которые перемещаются в строго установленном ритме от одного поста к другому по кольцевому пути, длина которого рассчитана на выполнение всего производственного цикла.

Ленточный конвейер — это движущаяся бесконечная лента, на которой выполняются следующие технологические операции:

- подготовка форм;
- установка арматуры;
- укладка бетонной смеси и ее уплотнение;
- тепловая обработка.

Ленточные конвейерные линии наиболее эффективны при серийном выпуске близких по типам и размерам изделий, поскольку в этом случае не требуется частая переналадка оснастки. Кроме того, производственные площади используются лучше, чем при стендовом способе.

В зависимости от удобоукладываемости бетонной смеси различают следующие ***способы формования*** и ***уплотнения смесей***:

- литье;
- формование простой вибрацией;
- виброформование с небольшой пригрузкой;
- принудительное уплотнение смеси прессованием, укаткой и трамбованием;
- вибропрессование;
- центрифугирование;
- вакуумирование и вибровакуумирование.

Литье характеризуется тем, что заполнение формы бетонной смесью происходит под действием собственной массы смеси. Этот метод применяется для литых или очень подвижных смесей.

Формование простой вибрацией используется для приведения малоподвижных и умеренно жестких смесей в пластично-текучее состояние.

Виброформование с небольшой пригрузкой используется для жестких бетонных смесей, требующих, кроме вибрации, дополнительного уплотнения.

Принудительное уплотнение смеси прессованием, укаткой и трамбованием применяется для особо жестких смесей. Вначале смесь подается в форму с большой скоростью, вследствие чего ее частицы размещаются в форме наиболее компактно. Затем смесь подвергается прессованию или укатке. Бетоны получаются с высокой плотностью и прочностью.

Вибропрессование применяется для смесей с повышенным начальным содержанием воды, избыток которой необходимо удалить в процессе уплотнения. После виброуплотнения свежеуложенная смесь подвергается прессованию.

Центрифугирование применяется при изготовлении пустотелых труб и опор линий электропередачи. При центрифугировании используют бетонные смеси с осадкой конуса 5...9 см и расходом цемента 350...450 кг/м^3. За счет центробежных сил при вращении формы излишняя вода отжимается из смеси и получают плотный и прочный бетон из подвижных смесей.

Стальные формы свободно устанавливают на две пары катков, вращение которых, благодаря трению, вызывает вращение форм. Бетонную смесь загружают при медленном вращении формы, что способствует равномерному ее распределению слоем необходимой толщины; затем частота вращения постепенно увеличивается до 800...1300 об./мин и бетонная смесь уплотняется (рис. 5.24).

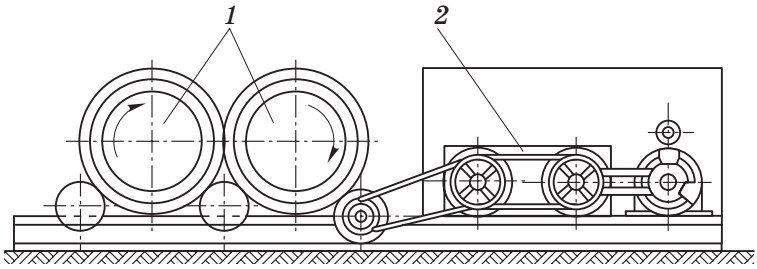


Рис. 5.24. Схема станка для изготовления труб центрифугированием:
1 — формы; *2* — вариатор скорости вращения форм

При ***вакуумировании*** и ***вибровакуумировании*** из бетонной смеси отсасываются защемленный в ней воздух и часть воды затворения, что ведет к увеличению плотности бетонной смеси, снижению водоцементного отношения и в связи с этим к улучшению физико-механических свойств бетона.

Наибольший эффект дает вакуумирование подвижных бетонных смесей, а также вибровакуумирование малоподвижных и умеренно жестких бетонных смесей. Применять вакуумирование для уплотнения жестких бетонных смесей малоэффективно.

Тепловлажностная обработка бетона. Отформованные изделия для ускорения твердения подвергаются тепловлажностной обработке, так как твердение бетона при обычной (комнатной) температуре протекает сравнительно медленно и в условиях заводского изготовления сборного железобетона нерентабельно. На заводах сборного железобетона наиболее широко применяют следующие виды тепловлажностной обработки бетона:

- пропаривание в специальных камерах периодического или непрерывного действия при нормальном давлении и температуре 70...100 °С;
- пропаривание в автоклавах при давлении около 8 атм (избыточных) и температуре не менее 175 °С;
- электротепловая обработка;
- теплообработка индукционными токами в электромагнитном поле.

Пропаривание при нормальном давлении. В настоящее время на большинстве заводов сборного бетона и железобетона и небольших производственных полигонах тепловую обработку изделий производят в специальных камерах при нормальном давлении. Изделия в формах загружают в камеру краном с укладкой в несколько рядов по высоте. После загрузки камеры закрываются специальными крышками, которые задерживают пар, используемый для нагревания изделий.

Пропаривание изделий в камерах производится по строго установленному режиму: нагрев — выдержка — остывание.

Наиболее ответственным этапом тепловой обработки является *повышение температуры до максимально установлен-*

ной, которая зависит от вида цемента. Для бетонов на быстротвердеющих цементах максимальная температура составляет 65...70 °С, на медленнотвердеющих цементах (пуццолановых, шлакопортландцементах) — 95...100 °С.

Не менее важным технологическим этапом является период *остывания изделий* после тепловой обработки. В это время должно происходить особенно медленное и равномерное понижение температуры по всему сечению изделия, поскольку из-за возможного большого перепада температур (между изделием и внешней средой) в бетоне могут появиться трещины. Продолжительность периода охлаждения бетона зависит от толщины изделия и других факторов: 1,5...2 ч для небольших и тонкостенных деталей, изготовленных из жестких бетонных смесей, 2...3 ч и более для масивных изделий из пластичных смесей.

Общая продолжительность тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий составляет 12...15 ч.

Пропаривание в автоклавах при давлении 0,9...1,3 МПа в среде насыщенного водяного пара и при температуре 175...200 °С способствует получению прочных изделий, особенно при использовании низкомарочных известково-кремнеземистых вяжущих. При таких условиях изделия с требуемой прочностью получают за 8...10 ч.

При автоклавной обработке изделий применяют медленнотвердеющие цементы. Это дает возможность не только снизить стоимость изделий (такие цементы дешевле), но и получить большой прирост прочности по сравнению с другими видами портландцемента.

В автоклавных портландцементных бетонах можно снизить расход цемента на 30...40 %, заменив его тонкомолотым кварцевым песком. При высоких давлении и температуре кварцевый песок активно взаимодействует с известью, образуя гидросиликаты кальция, что обеспечивает получение бетона с высокой прочностью.

Электротепловая обработка изделий и конструкций находит широкое применение в производстве. При этом способе через сформованное изделие пропускается переменный ток

промышленной частоты, а поскольку бетон обладает некоторым омическим сопротивлением (бетон — проводник второго рода), электроэнергия превращается в тепловую и бетон нагревается в заданном режиме. Электропрогрев дает возможность ускорить разогрев бетона до заданной максимальной температуры (95…100 °С), так как изделия нагреваются по всей толщине равномерно.

При электропрогреве улучшаются санитарно-гигиенические условия труда, процесс тепловой обработки изделий легче поддается автоматизации, отпадает также необходимость в пропарочных камерах. Однако в этом случае необходимо принимать меры по предотвращению преждевременного высушивания твердеющего бетона, а также по снижению теплопотерь. Поэтому бетонные изделия покрывают паронепроницаемыми пленками, мастиками и другими материалами, а также устраивают теплоизоляцию форм, если работы ведут в зимнее время на открытом воздухе.

Электрический ток через бетонное изделие пропускается при помощи металлических электродов, помещаемых внутри изделия или на его поверхности. Электроды устанавливают на расстоянии 15…40 см друг от друга и не ближе 5 см от арматуры. Наиболее распространены пластинчатые электроды, которые располагаются на наружных противоположных поверхностях изделия. Сплошные электроды в виде металлических листов одновременно являются боковой опалубкой или днищем формы. Стержневые электроды применяются при прогреве массивных изделий и конструкций. Расстояние между ними устанавливается специальным расчетом.

При электропрогреве требуется предварительное выдерживание бетонных и железобетонных изделий в течение 2…4 ч для того, чтобы они набрали минимальную критическую прочность перед тепловой обработкой.

Часто для тепловой обработки бетона в качестве источника тепла используют серийно выпускаемые промышленностью трубчатые электронагреватели (ТЭН). Их можно устанавливать в тепловых рубашках термоформ и применять при контактном способе передачи тепла изделию через ограждающие

поверхности форм, а также для обогрева среды, в которой твердеют изделия в открытых формах.

При электропрогреве бетонных и железобетонных изделий и конструкций необходимо строго соблюдать правила техники безопасности во избежание поражения работающих электрическим током.

Теплообработка индукционными токами в электромагнитном поле может проводиться в заводских условиях. Тепловая обработка в электромагнитном поле осуществляется в тоннельных камерах, по стенкам которых установлены электромагниты. Вокруг изделий в металлических формах создается электромагнитное поле, в результате чего в бетоне возникают индукционные токи, за счет которых и происходит нагрев.

Метод пока не нашел широкого применения, хотя может быть эффективен при нагреве густоармированного бетона.

5.8.4. Контроль качества бетона и изделий

Заключительным этапом производства продукции заводов бетонных и железобетонных изделий являются операции контроля их качества.

Контроль качества выпускаемых бетонных и железобетонных изделий и конструкций на заводах осуществляется лабораторией и отделом технического контроля (ОТК) завода. Лаборатория проверяет качество исходных материалов, подбирает состав бетона, определяет качество полуфабрикатов и бетона, а ОТК следит за правильностью технологических процессов и режимов тепловой обработки изделий.

Контроль качества готовых изделий производят выборочно. Вначале при внешнем осмотре выявляют трещины, раковины и другие дефекты, а затем при помощи измерительных линеек и шаблонов проверяют правильность формы и размеры изделий. Если при контрольных осмотрах и замерах выявляются дефекты и отклонения в размерах, превышающие допустимые, изделия бракуют. Кроме того, производится контроль качества армирования изделий, который заключается в проверке правильности установки арматурного каркаса,

стержней, сеток, закладных деталей, крюков, петель, а также в определении толщины защитного слоя бетона.

Прочность бетона устанавливают испытанием контрольных образцов, изготовленных одновременно с изделиями либо высверленных из готовых изделий.

Для определения ориентировочной *прочности бетона в конструкциях* используют неразрушающие физические и механические методы. К таким методам относятся акустические, склерометрические, радиоизотопный и метод просвечивания ионизирующими излучениями. Акустические приборы бывают ультразвуковые импульсные и ультразвуковые ударные. Определение прочности бетона акустическим методом основано на измерении скорости прохождения ультразвукового импульса или удара. Определение прочности бетона склерометрическим методом заключается в установлении глубины лунки в бетоне, образованной шариком в результате удара, или величины отскока маятника от бетона. Для повышения точности этих методов рекомендуется составлять тарировочные кривые на каждый вид бетона.

Неразрушающие методы контроля качества бетона, кроме склерометрических, позволяют также устанавливать внутренние дефекты изделий.

Готовые бетонные и железобетонные изделия испытывают на *несущую способность* согласно нормативным документам. Испытание проводят на специальных стендах с нагружением гидродомкратами, рычажными приспособлениями и штучными грузами. О прочности изделия судят по разрушающей нагрузке, о жесткости — по прогибам под контрольной нагрузкой, о трещиностойкости — по нагрузке, вызывающей появление трещин.

Бетонные и железобетонные однотипные изделия поставляют и принимают партиями, в которых все изделия изготовлены по одной технологии, в течение не более 10 сут. На каждую партию составляют паспорт, указывая качественные характеристики изделий, дату изготовления и наименование завода, а на каждое изделие наносят марку предприятия-изготовителя, марку изделия по каталогу, дату изготовления и номер браковщика ОТК.

5.8.5. Коррозия бетона и железобетона

Коррозией называют процесс медленного разрушения бетона и железобетона под воздействием различных агрессивных сред, следствием чего является постепенное снижение несущей способности конструкций и ухудшение эксплуатационных качеств сооружений и зданий в целом. Причины разрушения бетона и железобетона зависят от условий службы конструкций (на воздухе, под водой, в земле или в зоне переменного уровня воды) и вида агрессивной среды.

Изделия и конструкции из бетона и железобетона могут работать на открытом воздухе, а также в водной среде с агрессивными компонентами. В обоих случаях процессы коррозии и методы защиты от нее будут различаться.

Коррозия бетонных и железобетонных конструкций на воздухе. К бетонным и железобетонным конструкциям, работающим на открытом воздухе, относятся:

- железобетонные покрытия автомобильных дорог и аэродромов;
- конструкции мостовых сооружений;
- стойки дорожных знаков и ограждений на автомобильных дорогах и др.

Эти конструкции наиболее часто подвергаются медленному разрушению прежде всего вследствие коррозии стальной арматуры и значительно реже — бетона.

Арматура может корродировать лишь при относительной влажности воздуха более 50 %, так как только тогда в капиллярах и порах бетона находятся оба агрессивных агента — вода и кислород, совместное присутствие которых определяет возможность электрохимической коррозии стали.

Скорость коррозии стальной арматуры повышается с увеличением влажности окружающего воздуха и его температуры, а также при наличии в атмосфере некоторых агрессивных газов: хлора, хлористого водорода и др. Наиболее интенсивно процесс коррозии стальной арматуры протекает при относительной влажности воздуха 75...85 %. При более высокой влажности коррозия уменьшается и полностью прекращается: поры и капилляры заполняются водой и доступ кислорода к поверхности стали становится практически невозможным.

Одним из основных факторов, определяющих скорость коррозии арматурной стали, является состав жидкой фазы, находящейся в капиллярах бетона. Жидкая фаза в бетонах на обычных гидравлических вяжущих (портландцементе, шлакопортландцементе и др.) предельно насыщена $Ca(OH)_2$. В такой щелочной среде (pH 2...14) стали склонны переходить в пассивное состояние, при котором их стойкость к воздействию коррозионных сред значительно повышается.

Пассивирование металлов и металлических сплавов, как известно, связано с образованием на их поверхности защитных пленок. Некоторые вещества (например, хлористый кальций ($CaCl_2$) и другие соединения, содержащие ион хлора), а также некоторые газы (например, хлор), разрушают пассивирующие пленки и ускоряют процесс коррозии. Поэтому чрезмерная добавка солей NaCl и $CaCl_2$ к песчаным противогололедным смесям, рассыпаемым на бетонных покрытиях дорог и аэродромов, способствует коррозионному разрушению не только арматуры, но и самого бетона.

Характерным внешним признаком коррозии арматуры железобетонных конструкций являются постепенно расширяющиеся трещины в защитном слое бетона, ориентированные вдоль рабочей арматуры, и последующее откалывание бетона, обнажающее арматуру.

Степень агрессивности газовоздушных сред для железобетонных конструкций определяется не только относительной влажностью воздуха и наличием в нем агрессивных газов, но и видом бетона (тяжелый, легкий на пористых заполнителях, ячеистый). Так, например, не содержащая агрессивных газов воздушная среда с относительной влажностью воздуха не более 75 % для железобетонных конструкций на обычном плотном бетоне не является агрессивной. В этом случае защитный слой бетона надежно предохраняет арматуру от коррозии. Однако эта же среда является агрессивной для ограждающих железобетонных конструкций из легких (в частности, ячеистых) автоклавных бетонов. Долговечность таких конструкций обеспечивается рядом профилактических мероприятий (например, нанесением на арматуру защитных покрытий).

В зависимости от степени агрессивности газовоздушных сред и вида железобетонных конструкций стальную арматуру от коррозии защищают различными способами.

В железобетонных конструкциях из тяжелого бетона сохранность арматуры обеспечивается:

- повышением плотности и толщины защитного слоя бетона;
- введением в состав бетона пассивирующих добавок (например, нитрита натрия ($NaNO_3$) и др.);
- нанесением на открытые поверхности конструкций лакокрасочных материалов, вязких модифицированных битумов и др.

В железобетонных конструкциях из легких бетонов на пористых заполнителях сохранность арматуры обеспечивается теми же мероприятиями, однако их эффективность недостаточна в условиях повышенной и высокой агрессивности среды (при относительной влажности воздуха 75...85 % или при меньшей влажности, но в присутствии в газовоздушной среде хлора, хлористого водорода, сернистого ангидрида или других агрессивных газов). Для них требуется специальная защита.

Коррозия железобетонных конструкций под воздействием жидких агрессивных сред. Подводные и подземные части инженерных сооружений и зданий могут подвергаться коррозии в результате воздействия на них агрессивных грунтовых или морских вод.

Если в железобетонных конструкциях, работающих на открытом воздухе, постепенное разрушение железобетона вызывается коррозией стальной арматуры, то в агрессивных водах — преимущественно разрушением цементного камня.

Основными мероприятиями, повышающими долговечность железобетонных конструкций, которые подвергаются воздействию минерализованных вод, являются:

- правильный выбор вяжущего для бетона с учетом вида коррозии;
- использование высококачественных заполнителей (классифицированного песка и промытого фракционированного щебня);

- повышение плотности бетона путем ограничения водоцементного отношения (В/Ц ≤ ,5);
- тщательное виброуплотнение бетонной смеси при укладке.

При высокой степени агрессивности минерализованных вод, когда перечисленные мероприятия не обеспечивают требуемую долговечность сооружений, следует применять конструктивные меры защиты, исключающие возможность проникания воды внутрь бетона:

- покрытие поверхности бетона водонепроницаемыми синтетическими материалами (смесью жидкого стекла и кремнефтористого натрия), керамическими плитками;
- облицовка поверхности естественным камнем;
- пропитка бетона битумом, петралатумом и др.;
- оклейка рулонными водонепроницаемыми материалами и др.

Особое внимание следует уделять конструированию плотных стыков между элементами конструкций. Многие конструкции транспортных сооружений (водопропускные дорожные трубы, балки пролетных строений мостов, обделка тоннелей из обычных сборных железобетонных элементов и т.д.) подвергаются коррозии именно в местах их стыковки.

Действенным методом защиты от коррозии являются мероприятия по удалению агрессивных вод от сооружения: устройство дренажа, водопонижение, водоотвод. Например, в тоннелях со сборной железобетонной обделкой пространство между поверхностью конструкции и грунтом цементируют. Это также препятствует проникновению воды в тоннель.

Для получения устойчивых к коррозии бетонов прежде всего необходимо применять соответствующие агрессивности среды цементы (сульфатостойкий, шлаковый, глиноземистый и пуццолановый портландцементы). Значительно повышает стойкость бетонов к коррозии введение в их состав активных минеральных добавок, в качестве которых могут быть использованы доменные гранулированные шлаки, трепел, туф, опока, диатомит и др.

Вопросы и задания для самопроверки

1. По каким признакам классифицируются бетоны?

2. Назовите основные материалы для бетона. Какие требования к ним предъявляются?

3. Как подразделяются добавки к бетону в зависимости от основного эффекта действия?

4. Что такое суперпластификаторы? Для чего их применяют?

5. Перечислите основные свойства бетонной смеси.

6. Что такое макро- и микроструктура бетона?

7. Назовите виды микропор в цементном камне.

8. Как классифицируются бетонные смеси по показателю удобоукладываемости?

9. Что отражает основной закон прочности бетона?

10. Как изменяется прочность бетона от возраста (формула)?

11. Назовите основные этапы проектирования состава бетона (общий алгоритм).

12. Назовите основные этапы технологии бетона.

13. Как осуществляется транспортирование бетонной смеси, ее укладка и уплотнение?

14. Назовите основные свойства бетона.

15. Что такое марка и класс бетона по прочности?

16. Что отражает марка бетона по морозо- и водонепроницаемости?

17. Опишите реологическую модель бетона.

18. Назовите виды усадки бетона.

19. В чем особенности дорожного цементобетона и других видов специальных бетонов?

20. Что такое коэффициент химической стойкости бетона?

21. В чем сущность бетона сухого формования?

22. Дайте определение понятию «легкий»бетон.

23. Дайте определение термину «железобетон». В чем его достоинства?

24. Опишите технологию изготовления предварительно-напряженных изделий из железобетона.

25. Перечислите основные изделия из железобетона.

26. Назовите основные процессы производства бетонных и железобетонных изделий.

27. В чем сущность тепловлажностной обработки бетона?

28. Что такое коррозия бетона и железобетона? Назовите методы защиты от нее.

29. Какие три вида пор различают в цементном камне?

30. Как осуществляется контроль качества бетонных изделий?

6 ИСКУССТВЕННЫЕ КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В дорожном хозяйстве применяются различные искусственные каменные строительные материалы, используемые для возведения зданий и сооружений промышленно-гражданского назначения.

Такие материалы можно разделить на три группы: ***необжиговые, обжиговые*** и ***изделия из силикатных расплавов***.

6.1. Необжиговые строительные материалы и изделия

К необжиговым строительным материалам относятся:

- автоклавные силикатные материалы на основе извести;
- гипсовые и гипсобетонные изделия;
- асбестоцементные материалы и изделия;
- строительные растворы.

6.1.1. Автоклавные силикатные материалы на основе извести

Автоклавные силикатные материалы — искусственные каменные материалы на основе известково-кремнеземистого вяжущего, твердеющего при повышенном давлении и температуре.

Основным компонентом сырьевой смеси, из которой получают силикатные материалы, является *известь* (CaO), легко вступающая в реакцию с кремнеземом (SiO_2) при усиленной термовлажностной обработке. Для производства силикатных материалов рекомендуется применять быстрогасящуюся известь с суммарным содержанием активных оксидов кальция и магния (активностью) более 70 %, при этом содержание MgO не должно превышать 5 %.

Наряду с известью, в автоклавной технологии возможно применение портландцемента, цементов с добавкой молотого песка, малоактивных белитовых цементов, которые повышают морозостойкость силикатных изделий.

Вторым компонентом сырьевой смеси является *кварцевый песок* (иногда доменные шлаки, топливные золы, содержащие кремнезем). Кварцевый песок и другие кремнеземистые компоненты тонко измельчают (до удельной поверхности 1500...3000 $см^2/г$).

Кроме известково-кремнеземистого вяжущего, в состав силикатных материалов могут быть введены заполнители в виде немолотого кварцевого песка, шлака, керамзита, вспученного перлита.

К автоклавным силикатным материалам относят:

- силикатные бетоны;
- силикатный кирпич;
- известково-шлаковый и известково-зольный кирпич;
- стеновые изделия из ячеистого и пеносиликатного бетонов.

Изделия из силикатных материалов приобретают требуемые свойства после автоклавной обработки: постепенного подъема давления пара и температуры в течение 1,5...2 ч, изотермической выдержки изделия в автоклаве при температуре 175...200 °С и давлении 0,8...1,6 МПа в течение 4...8 ч и снижении давления в течение 2...4 ч. Общая длительность обработки 8...14 ч. В результате формируется новый известково-кремнеземистый цемент, состоящий из гидросиликатов кальция различного состава.

При автоклавной обработке происходит реакция между гидроксидом кальция и кремнеземистым компонентом:

$$n\mathrm{Ca(OH)_2} + \mathrm{SiO_2} + m\mathrm{H_2O} \rightarrow n\mathrm{CaO} \cdot \mathrm{SiO_2} \cdot m\mathrm{H_2O}.$$

В результате такой реакции синтезируется цементирующее вещество — гидросиликат кальция, связывающий зерна песка или другого заполнителя в прочный водостойкий каменный материал.

Автоклав для гидротермального синтеза представляет собой цилиндрический горизонтальный сварной сосуд, гер-

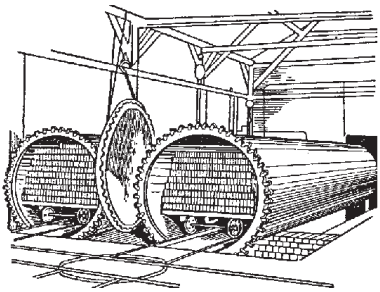


Рис. 6.1. Загрузка силикатного кирпича в автоклав

метически закрываемый сферическими крышками (диаметр 2...3,6 м, длина 19...30 м) (рис. 6.1).

Силикатные бетоны (как и цементные) могут быть:

- тяжелыми (заполнитель — песок и щебень);
- легкими (заполнители пористые — керамзит, вспученный перлит, аглопорит);
- ячеистыми.

В силикатном бетоне используют известково-кремнеземистое вяжущее, состоящее из воздушной извести и тонкого измельченного кварцевого песка (золы, молотого доменного шлака и др.).

Прочность известково-кремнеземистого вяжущего зависит:

- от активности извести;
- соотношения CaO/SiO_2;
- тонкости измельчения песка;
- параметров автоклавной обработки.

Технология изготовления бетонных и железобетонных изделий включает:

1) приготовление известково-кремнеземистого вяжущего;
2) подготовку и перемешивание силикатобетонной смеси;
3) формование изделий;
4) автоклавную обработку.

Тяжелый силикатный бетон плотностью 1800...2500 км^3 и прочностью 15...18 МПа применяют для изготовления сборных бетонных и железобетонных конструкций, в том числе предварительно напряженных. Высокопрочные силикатные

бетоны могут иметь прочность до 80 МПа. Морозостойкость силикатного бетона при вибрационном уплотнении достигает 200 циклов и более.

Наибольшее распространение получили следующие марки плотного силикатного бетона: М150; М200; М250; М300; М400 и М500.

Из плотных силикатных бетонов изготовляют крупные стеновые блоки внутренних несущих стен, панели перекрытий и несущих перегородок, плиты и другие детали для сборного, промышленного, гражданского и сельскохозяйственного строительства.

Ячеистые силикатные бетоны изготовляют путем введения в известково-кремнеземистое вяжущее газообразующей добавки (газобетон) или пены (пенобетон). В качестве газообразователя используют водную суспензию алюминиевой пудры, пенообразователя — клееканифольные, смолосапониновые и другие вещества.

Газобетонную смесь готовят в гидродинамическом или вибрационном смесителе, пенобетонную — в двухбарабанном смесителе. В одном барабане приготавливают пену, в другом — раствор из вяжущего и воды. После этого пена выгружается в барабан с раствором и перемешивается, затем силикатобетонная смесь выливается в раздаточный бункер, а затем — в формы изделия.

Отформованные изделия после выдержки в течение 6...8 ч направляют в автоклавы для твердения.

В зависимости от назначения ячеистые бетоны подразделяют:

- на конструкционные ($\rho_о$ = 900...1200 кг/м^3, $R_{сж}$ = 7,5...15 МПа);
- теплоизоляционно-конструкционные ($\rho_о$ = 500...900 кг/м^3, $R_{сж}$ = 2,5...7,5 МПа);
- теплоизоляционные ($\rho_о \le 500$ кг/м^3, $R_{сж} \le 2,5$ МПа).

Силикатный кирпич представляет собой искусственный безобжиговый стеновой строительный материал, получаемый из жесткой увлажненной сырьевой смеси, состоящей из извести и кварцевого песка, путем ее прессования и твердения в автоклаве.

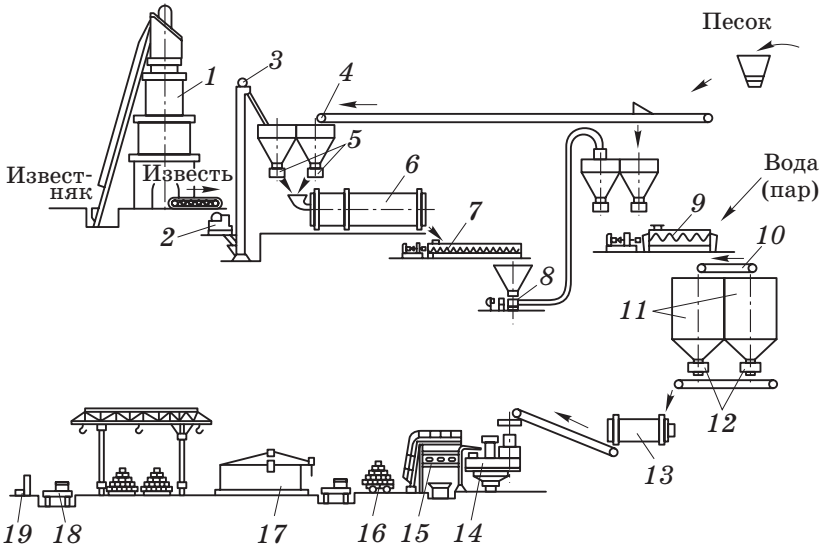


Рис. 6.2. Типовая схема производства силикатного кирпича: *1* — печь для обжига извести; *2* — дробилка; *3* — вертикальный ковшовый конвейер; *4* — ленточный конвейер; *5*, *12* — тарельчатые питатели (дозаторы); *6* — мельница для помола извести с песком; *7* — винтовой питатель; *8* — двухкамерный пневмонасос; *9* — смеситель; *10* — ленточный реверсивный конвейер; *11* — силосы (реакторы); *13* — стержневой смеситель; *14* — пресс; *15* — автомат-укладчик *16* — вагонетка; *17* — автоклав; *18* — электропередаточная тележка; *19* — установка по очистке платформы автоклавных вагонеток

В состав сырьевой смеси входят:

- известь (6...8 %, считая на активный CaO);
- кварцевый песок (92...94 %);
- вода (7...9 %).

Технологический процесс производства силикатного кирпича включает следующие операции (рис. 6.2):

1) добыча и подача песка;

2) дробление и помол негашеной извести;

3) смешивание песка с молотой известью;

4) гашение смеси извести с песком;

5) дополнительное перемешивание и увлажнение смеси (до 7...9 % воды);

6) прессование кирпича-сырца;

7) запаривание кирпича-сырца в автоклаве.

В зависимости от способа гашения извести в смеси с песком различают силосный и барабанный виды производства силикатного кирпича. При более распространенном *силосном способе* перемешанная увлажненная смесь извести и песка выдерживается 8...9 ч в бункерах-силосах. Гасить известь в смеси с песком можно также в *гасильном барабане*, который представляет собой металлический цилиндр, по концам имеющий форму усеченных конусов, вращающихся вокруг горизонтальной оси. Песок дозируют по объему, а известь — по весу. После загрузки барабан вращают, впуская пар, и гасят известь под давлением 0,3...0,5 МПа. Перед прессованием известково-песчаную смесь перемешивают в лопастной мешалке или на бегунах и дополнительно увлажняют (до 7 %).

Прессование кирпича производят на механических прессах под давлением 15...20 МПа, после чего прочность кирпича-сырца должна быть не ниже 0,3 МПа.

Отформованный кирпич-сырец укладывают в вагонетки, которые подают в автоклав (см. рис. 6.1).

Выгруженный из автоклава кирпич выдерживают 10...15 сут. на воздухе для карбонизации извести, не вступившей в химическое взаимодействие с кремнеземом, по следующей схеме:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O.$$

Силикатный кирпич обычно светло-серый, но может быть любого цвета вследствие введения в состав смеси щелочестойких пигментов.

Выпускают кирпич двух видов: *одинарный* (250×120×65) мм и *модульный* (250 × 120 × 88 мм) с пустотами, благодаря которым масса одного кирпича не превышает 4,3 кг.

В зависимости от предела прочности на сжатие и изгиб силикатный кирпич имеет марки: 100, 125, 150, 200, 250.

Плотность силикатного кирпича (без пустот) около 1800...1900 кг/м^3, т.е. он тяжелее обыкновенного глиняного кирпича, теплопроводность 0,70...0,75 Вт/(м · °С), водопоглощение лицевого кирпича не превышает 14 %, рядового — 16 %.

Марки по морозостойкости для лицевого кирпича: $М_{рз}25$, 35, 50; для рядового — $М_{рз}15$.

Силикатный кирпич, как и глиняный, применяют для возведения несущих стен зданий. Не рекомендуется его использовать для устройства цоколей из-за недостаточной водостойкости, а также для укладки труб и печей, так как при высокой температуре $Ca(OH)_2$ дегидратируется, $CaCO_3$ и гидросиликаты кальция разлагаются, а зерна кварцевого песка при 573 °С расширяются в результате полиморфного превращения кварца в другую разновидность, что вызывает растрескивание кирпича.

На производство силикатного кирпича расходуется меньше тепла, чем на производство глиняного, поскольку не требуются сушка и высокотемпературный обжиг, поэтому он дешевле на 30...40 %.

Известково-шлаковый кирпич изготовляют из смеси извести (3...12 % по объему) и гранулированного доменного шлака (88...97 %). При замене шлака золой получается ***известково-зольный кирпич***. Состав смеси: 20...25 % извести и 75...80 % золы.

Так же как и шлак, зола является дешевым сырьем, образующимся в больших количествах после сжигания топлива (каменного или бурого угля и др.) в котельных ТЭЦ, ГРЭС и др.

При сгорании пылевидного топлива часть очаговых остатков оседает в топке (зола-шлак), а самые мелкие частицы золы уносятся в дымоходы, где задерживаются золоуловителями, а затем их транспортируют в золоотвалы. Наиболее тонкодисперсные зóлы называют *зола-унос*. При смешивании с водой зóлы не твердеют, однако при добавках извести или портландцемента они активизируются, а запаривание смеси в автоклавах дает возможность получать изделия достаточной прочности.

Известково-шлаковый и известково-зольный кирпичи формуют на тех же прессах, что и при производстве силикатного кирпича, и запаривают в автоклавах.

Плотность шлакового и зольного кирпичей 1400...1600 кг/м^3, коэффициент теплопроводности 0,5...0,6 Вт/(м · К). По преде-

лу прочности на сжатие шлаковый и зольный кирпичи разделяют на три марки: 75, 50 и 25. Морозостойкость известково-шлакового кирпича такая же, как и силикатного, а известково-зольного — ниже.

Известково-шлаковый и известково-зольный кирпичи применяют для возведения стен зданий высотой не более трех этажей и для кладки верхних этажей многоэтажных зданий.

Изделия из пеносиликата и силикатных ячеистых бетонов. *Пеносиликат* — искусственный каменный материал ячеистой структуры. Он получается в результате затвердевания пластичной известково-песчаной смеси, смешанной с технической пеной. Если такая смесь смешивается с газообразователем (алюминиевой пудрой, пергидролем и др.), то образуемый каменный материал ячеистой структуры называют *газосиликатом*.

Для производства пеносиликата применяют молотую известь-кипелку (активный CaO не менее 70 %) в количестве 15...20 % от веса сухой смеси. Кроме кварцевого песка, в качестве заполнителей можно использовать доменный гранулированный шлак, золу-унос и другие заполнители, содержащие большое количество SiO_2.

Тонкость помола известково-песчаной смеси находится в пределах 2900...3200 $см^2/г$.

Технологический процесс производства ячеистых силикатных изделий состоит из следующих операций (рис. 6.3):

1) приготовление известково-песчаного вяжущего (количество песка 20...50 % от веса извести);

2) измельчение песка;

3) приготовление пено- или газобетонной массы;

4) формование изделия в металлических формах;

5) обработка изделий в автоклаве.

Ячеистые силикатные изделия изготовляют как армированными, так и неармированными. В армированных силикатных бетонах стальная арматура и закладные детали больше подвержены коррозии, чем в цементных бетонах, поэтому их покрывают защитными составами (цементно-казеиновыми, полимерцементными).

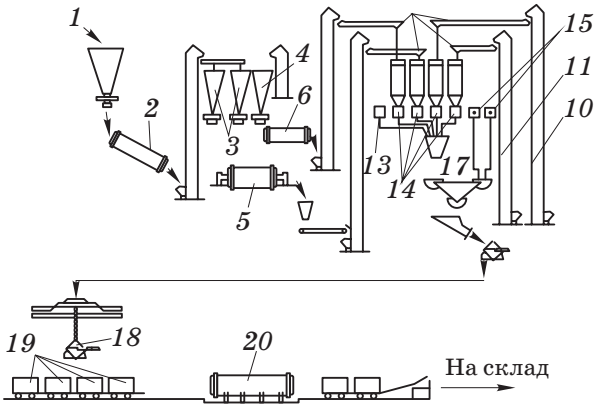


Рис. 6.3. Технологическая схема производства пеноблоков на смешанном вяжущем:
1 — склад песка; *2* — сушильный барабан; *3* — бункер для сухого песка; *4* — бункер для извести; *5* — шаровая мельница для помола песка; *6* — шаровая мельница для совместного помола извести и песка; *7* — система шнеков; *8* — бункер для известково-песчаной смеси; *9* — бункер для молотого песка; *10* — элеватор подачи цемента; *11* — элеватор подачи молотой извести; *12* — бункер для цемента; *13* — бункер для молотой извести; *14* — весовые дозаторы; *15* — дозатор воды; *16* — дозатор пенообразователя; *17* — пенобетономешалка; *18* — подъемник для разлива массы в формы; *19* — вагонетки с формами; *20* — автоклав

Силикатные изделия из ячеистого бетона подразделяются:

- на теплоизоляционные — средней плотностью до 500 кг/м^3 и прочностью на сжатие до 2,5 МПа;
- конструктивно-теплоизоляционные — средней плотностью 500...800 кг/м^3 и прочностью на сжатие 2,5...7,5 МПа;
- конструктивные — средней плотностью 850 кг/м^3 и прочностью на сжатие 7,5...15,0 МПа.

6.1.2. Гипсовые и гипсобетонные изделия

К таким изделиям относят изделия, изготовленные на основе гипсовых и гипсоцементных вяжущих.

Быстрое твердение гипса и его хорошие формовочные свойства позволяют изготавливать сборные крупноразмерные элементы различного назначения: плиты и панели стен для устройства внутренних перегородок зданий, основания под полы и др. Поскольку плиты и панели на основе гипсовых вяжущих достаточно огнестойки, их часто применяют для огнезащитной облицовки металлических и деревянных конструкций.

Для производства гипсовых и гипсобетонных изделий используют строительный и высокопрочный гипсы, а также гипсошлаковый цемент, который не вызывает коррозии стальной арматуры.

Изделия из гипса подразделяют на гипсовые и гипсобетонные.

Гипсовые изделия изготавливают из гипсового теста, иногда с добавкой молотых органических или минеральных заполнителей.

Гипсобетонные изделия получают из гипсового раствора с легкими и пористыми заполнителями. В качестве органических заполнителей используют молотую бумажную макулатуру, древесные опилки и др., в качестве минеральных — топливные и доменные шлаки, ракушечник, пемзовый и туфовый щебень и др.

Заполнители снижают прочность гипсовых изделий. Поэтому для повышения их прочности уменьшают расход воды, однако при этом требуется применять вибропрессование или трамбование.

Изделия на основе гипса имеют небольшую плотность: гипсовые — 800...1100 кг/м^3, гипсобетонные — 1200...1500 кг/м^3. Прочность изделий — 2,5...10 МПа. Эти материалы обладают хорошими звуко- и теплоизоляционными свойствами, хорошо обрабатываются и легко окрашиваются.

6.1.3. Асбестоцементные материалы и изделия

Асбестоцемент представляет собой искусственный каменный материал, получаемый в результате затвердевания смеси цемента, асбеста и воды. Введение в цементный раствор небольшого количества (10...20 %) тонковолокнистого асбеста, обладающего высокой прочностью при растяжении, обеспечивает высокую прочность изделий на растяжение и изгиб. Исходная сырьевая смесь в расчете на массу сухих веществ содержит в среднем 85 % цемента и 15 % асбеста.

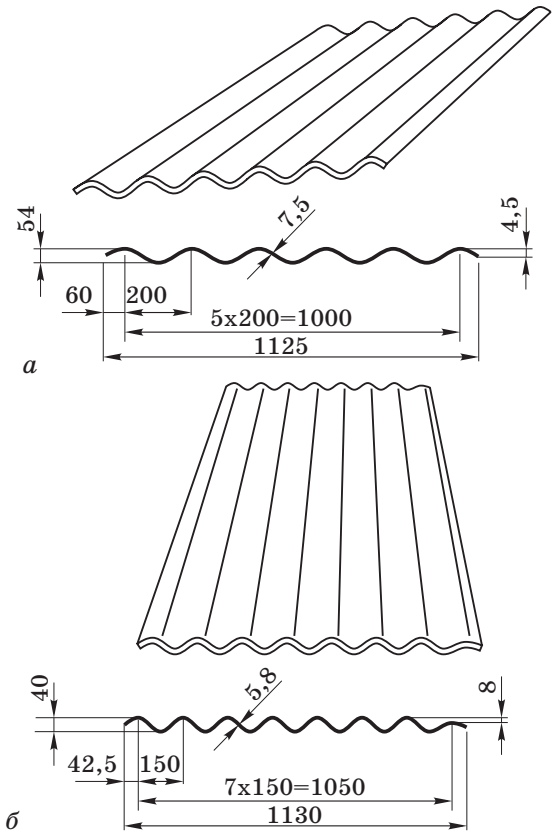


Рис. 6.4. Асбестоцементные волнистые листы:
а — унифицированного профиля; *б* — средневолнистого профиля

Асбест — природный тонковолокнистый материал, состоящий из водных и безводных силикатов магния (иногда кальция и натрия). 95 % мировой добычи асбеста составляет *хризотил* ($3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), который и применяется для производства асбестоцементных изделий. Диаметр волокон асбеста 1 мкм. Эти волокна обладают гибкостью, прочностью до 600...800 МПа, их введение в качестве армирующего компонента в цемент, позволяет в 3–5 раз увеличить прочность цементного камня при растяжении и изгибе, а также стойкость к ударным воздействиям.

В качестве вяжущего применяют специальный портландцемент, обладающий более тонким помолом, что вызвано необходимостью создания требуемой поверхности сцепления с тонкораспушенными волокнами асбеста.

В практике жилищного строительства (малоэтажные здания) при устройстве кровель, складов и др. наибольшее распространение получили кровельные асбестоцементные изделия: волнистые листы различного профиля (рис. 6.4), крупноразмерные плоские листы, асбестоцементные панели для покрытий промышленных зданий (рис. 6.5).

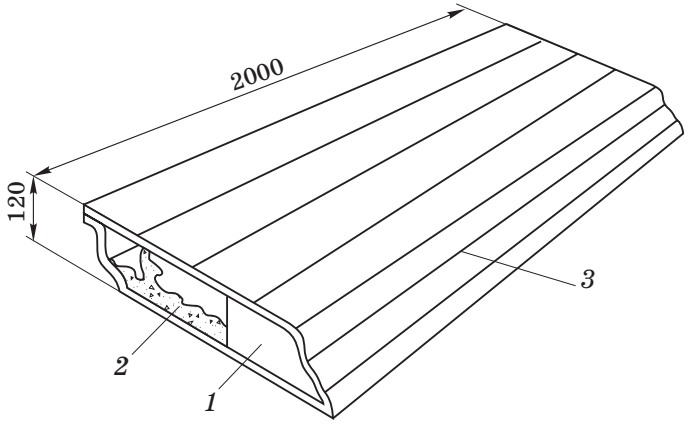


Рис. 6.5. Асбестоцементная панель для покрытий промышленных зданий:
1 — торцовая заглушка из асбестоцемента; *2* — минераловатная плита; *3* — гнутый асбестоцементный лист

Из асбестоцемента изготавливают также трубы напорные — для водопроводов (давление 0,6...1,8 МПа) и безнапорные — для канализации, дренажа, прокладки телефонных кабелей.

6.1.4. Строительные растворы

Строительный раствор — искусственный материал, получаемый после укладки и твердения правильно подобранной смеси, состоящей из неорганических вяжущих веществ, песка и воды. В необходимых случаях (для повышения пластичности смеси, замедления и схватывания или ускорения твердения) в нее вводят специальные добавки. Такие смеси до затвердевания называют ***растворными смесями (растворами)***.

По существу, затвердевшие растворы — это мелкозернистые бетоны. Поэтому общие закономерности, характерные для бетонов, применимы и к растворам. В частности, прочность растворов зависит от марки вяжущего и величины водовяжущего отношения.

При использовании растворов учитываются их особенности:

- растворы укладывают тонкими слоями (1...2 см), не применяя механического уплотнения;
- растворы в большинстве случаев наносят на пористое основание (кирпич, бетон, пористые камни), которое способно сильно отсасывать воду, изменяя конечные свойства раствора.

Строительные растворы в зависимости от назначения делятся на кладочные, отделочные и специальные.

Кладочные растворы применяют для скрепления элементов конструкций (кладка стен из кирпича, устройство фундаментов из бетонных блоков и др.).

Отделочные растворы служат для оштукатуривания стен, устройства выравнивающих слоев, декоративной отделки поверхности стеновых панелей, фасадов и внутренних интерьеров зданий.

Специальные растворы (инъекционные жаростойкие, кислотостойкие, рентгенозащитные, акустические) применяют в

случаях, когда к конструкциям предъявляют особые требования.

По плотности растворы подразделяются:

- на тяжелые (средняя плотность более 1500 кг/м^3);
- легкие (средняя плотность менее 1500 кг/м^3).

По виду вяжущего они подразделяются на цементные, известковые и смешанные.

Строительные растворы изготовляют, как правило, централизованно на автоматизированных растворных заводах или на строительных базах и доставляют на объекты в виде пластических смесей, готовых к употреблению. При значительном удалении строительного объекта от завода рекомендуется изготовлять ***сухие растворные смеси***, которые затворяют водой и перемешивают на месте производства работ. Влажность сухих смесей должна быть не более 1 % по массе. Их поставляют в упаковке, исключающей возможность увлажнения. В настоящее время сухие смеси получили широкое распространение, особенно для приготовления растворов, используемых для отделки фасадов и интерьеров зданий. В связи с тем что в заводских условиях обеспечивается более тщательная подготовка и дозировка компонентов раствора и, следовательно, получение готового раствора высокого качества с заданными свойствами, применение сухих смесей в перспективе будет увеличиваться.

Растворы специального назначения обязательно должны изготавливаться в виде готовых смесей на заводах.

Основные свойства растворов. Свойства растворов, как и бетонов, зависят от состава, условий укладки и срока твердения.

Свойства растворной смеси определяются, прежде всего, *удобоукладываемостью*, т.е. способностью укладываться на основание (например, кирпич) тонким равномерным слоем.

Удобоукладываемый (пластичный) раствор хорошо заполняет все неровности основания и равномерно сцепляется со всей его поверхностью. «Жесткий» раствор имеет контакт с основанием лишь на отдельных участках, создавая слой неодинаковой плотности. При этом резко ухудшается сопротив-

ляемость кладки возможным механическим и погодно-климатическим воздействиям.

Удобоукладываемость раствора зависит от степени подвижности свежеуложенного раствора и его водоудерживающей способности.

Подвижность растворных смесей характеризуется глубиной погружения металлического эталонного конуса массой 300 г. Ее выбирают с учетом назначения раствора и способа производства работ. Например, растворы, перекачиваемые по трубопроводам, должны иметь глубину погружения конуса до 14 см, а растворы для кирпичной кладки — 1...3 см.

Водоудерживающая способность характеризует способность растворной смеси удерживать в своем составе достаточное для твердения вяжущего количество воды в условиях интенсивного ее отсоса пористым основанием. Водоудерживающую способность оценивают по количеству воды, отсасываемой из пробы растворной смеси промокательной бумагой. Ее увеличивают путем введения в растворную смесь неорганических дисперсных добавок и органических пластификаторов.

Смесь с хорошей водоудерживающей способностью при укладке на пористое основание отдает излишнюю воду, при этом раствор постепенно становится плотнее и прочнее, приобретает хорошее сцепление с основанием. Растворы с недостаточной водоудерживающей способностью подвергаются расслоению, что нарушает однородность смеси и снижает прочность.

Необходимая удобоукладывемость достигается при правильном выборе соотношения между составляющими материалами и надлежащем зерновом составе песка. Тесто вяжущего должно заполнять пустоты в песке и покрывать его зерна тонким слоем.

Прочность строительных растворов на сжатие определяют на образцах-кубах с длиной ребра 7,07 см, а на растяжение при изгибе — на балочках размерами $4 \times 4 \times 16$ см.

По пределу прочности на сжатие строительные растворы имеют следующие марки (МПа): М0,4; М1,0; М2,5; М5; М7,5; М10,0; М15,0; М20,0. Растворы марок М0,4 и М1,0 изготов-

ляют преимущественно из извести или местных вяжущих (известково-шлакового или известково-пуццоланового цемента).

На практике обычно используют растворы прочностью 1...5 МПа, так как для их получения необходимо значительно меньше цемента. Такие цементы могут быть изготовлены на цементных заводах путем совместного помола небольшого количества клинкера (25...30 %) с большим количеством минеральных компонентов: известняка, шлака, доломита, золы-уноса и др.

Получаемый низкомарочный «кладочный» цемент (цемент для строительных растворов) имеет марку М20.

Морозостойкость растворов зависит от тех же факторов, что и морозостойкость бетонов: свойств исходных материалов, рационального соотношения между ними, расхода воды и условий твердения. Важным условием, обеспечивающим необходимую морозостойкость, является количество воды затворения. Вода как компонент растворной смеси обеспечивает протекание химической реакции с цементом (полезная вода), вода как пластификатор полезна только в период приготовления и укладки раствора. В связи с этим расход воды в таких случаях должен быть оптимальным, а его минимизация может быть обеспечена введением пластифицирующих (например, ЛСТ) и особенно микровоздухововлекающих (например, мылонафт) добавок

Применение растворов различных видов. Растворы в зависимости от вида вяжущего и заполнителя обладают различными свойствами и в связи с этим могут быть использованы как для соединения элементов кладки, так и для получения обрабатываемой поверхности с определенными свойствами.

Растворы для каменной кладки и монтажа стен панелей и крупных блоков. Вид и состав таких растворов зависят от расчетных напряжений и условий эксплуатации. Состав растворов обычно назначают, используя готовые таблицы, и корректируют по результатам испытаний в строительной лаборатории.

Кладку надземных конструкций, работающих при небольших напряжениях, следует выполнять из растворов, содержащих дешевые местные вяжущие вещества (известь, из-

вестково-шлаковое, известково-пуццолановое вяжущее). При кладке фундаментов в агрессивных условиях применяют сульфатостойкий портландцемент. Для монтажа блочных и крупнопанельных стен используют портландцемент, шлакопортландцемент, а также портландцементы с органическими добавками. Кладку подземных конструкций обычно выполняют на цементно-песчаных растворах без добавок глины или извести.

Выбор подвижности растворных смесей зависит от вида элементов кладки, их пористости. Например, при кладке стен из крупных панелей и блоков, пустотелого кирпича, блоков из пористых горных пород подвижность должна быть в пределах 5...8 см, при заливке пустот в бутовой кладке — 13...14 см и т.д. Рекомендуемая подвижность для каждого случая приводится в специальных таблицах.

При кладке растворов зимой скорость твердения сильно замедляется, поэтому используют раствор, имеющий марку на одну-две ступени выше, чем летом.

Известково-гипсовые растворы применяют для ***оштукатуривания*** внутренних деревянных и каменных стен, потолков. Они быстро твердеют и имеют прочное сцепление с основанием.

Декоративные растворы используют при заводской отделке лицевых поверхностей стеновых панелей. Для этого применяют декоративные составы — полимерцементные, цементно-перхлорвиниловые. Декоративные растворы должны в течение всего периода эксплуатации сохранить первоначальный цвет, текстуру, обладать морозо-, свето- и водостойкостью.

К ***специальным*** растворам относятся:

- инъекционные цементные — используются для заполнения каналов в предварительно напряженных конструкциях (марка раствора должна быть не ниже 300 с использованием портландцемента марок 400 и 500);
- тампонажные — применяются для гидроизоляции скважин, шахтных стволов и тоннелей путем закрытия трещин и пустот в горных породах и заполнения закрепленного пространства (для этих растворов применяют тампонажный и сульфатостойкий портландцементы);

- рентгенозащитные — готовятся на портландцементе или шлакопортландцементе с использованием баритового песка ($BaSO_4$) с максимальной крупностью 1,25 мм;
- акустические — предназначены для звукопоглощающей штукатурки.

6.2. Обжиговые керамические строительные материалы и изделия

Керамические материалы — искусственные каменные материалы, полученные в процессе обжига (900...1300 °С) предварительно отформованных высушенных изделий из глиняных масс или из их смесей с минеральными добавками. В результате обжига глиняная масса превращается в искусственный камень, обладающий высокой прочностью, плотностью, водостойкостью, морозостойкостью и долговечностью.

Керамика является одним из первых искусственных каменных материалов, который человек изготавливал, а не брал готовым из природы. Начало керамического производства относится к XII–XV вв. до н.э. Первые керамические изделия изготавливали для бытовых нужд; изделия для строительных целей появились значительно позже: возраст обожженного глиняного кирпича составляет около 5000 лет.

Долгое время основным сырьем для производства строительных керамических изделий была глина. В настоящее время, кроме глины, в качестве сырья, например для производства кирпича, используют золу ТЭС, кремнистые породы. Для производства огнеупоров используют кварцит, магнезит, кокс, карбид кремния и др.

Появились и абсолютно новые композиционные керамические материалы: металлокерамические композиции (керметы) и волокнистые композиции, состоящие из металлической матрицы и керамических волокон или нитевидных кристаллов на уровне наночастиц.

6.2.1. Классификация керамических материалов

Современная промышленность строительных материалов выпускает широкий ассортимент керамических материалов и изделий, позволяющих использовать их во всех частях зданий и сооружений — от фундамента до кровли.

По степени спекаемости и пористости керамические изделия, оцениваемые по их водопоглощению, подразделяются на пористые с водопоглощением черепка более 5 % и плотные (спекшиеся) с водопоглощением менее 5 % , не пропускающие воду.

Таблица 6.1

Классификация изделий строительной керамики

Структура керамики	Группа материала	Изделия строительной керамики	
		пористые	плотные (спекшиеся)
Грубая	Стеновые	Кирпич полнотелый, пустотный, пористый, лицевой; керамические камни, виброкерамические панели из кирпича и камней	—
	Фасадные	Плиты и плитки глазурованные и неглазурованные; ковровая мозаика	—
	Кровельные	Неглазурованная и глазурованная черепица	—
	Для перекрытий	Специальные камни, балки и панели из них	—
	Для полов	—	Плитки, ковровая мозаика
	Для подземных сооружений	Дренажные трубы	Канализационные трубы
	Дорожные	—	Клинкерный кирпич, тротуарная плитка, фигурный кирпич
	Теплоизоляционные	Ячеистая керамика; изделия из диатомита и трепела	
	Заполнители: для легких бетонов для тяжелых бетонов	 Керамзит, аглопорит, термолит и др. Керамдор и др.	—

Окончание табл. 6.1

Структура керамики	Группа материала	Изделия строительной керамики	
		пористые	плотные (спекшиеся)
Тонкая	Санитарно-строительные изделия из фаянса	Умывальники, бачки, унитазы и др.	Умывальники, бачки, унитазы и др.
	Облицовочная керамика для внутренней отделки	Фаянсовая плитка, плинтусы, детали	—

Изделия строительной керамики классифицируют также по назначению (табл. 6.1).

Керамические материалы находят широкое применение в дорожном строительстве. Использование клинкерного кирпича и тротуарных плит в покрытиях дорог и тротуаров подчеркивает архитектурную выразительность городов. Строительный кирпич и камни, отделочные керамические материалы применяют при строительстве зданий и сооружений для обслуживания дорог. Бетоны на искусственных керамических заполнителях (керамдоре, керамзите, аглопорите и др.) используют для дорожных покрытий, конструкций мостов и пр.

Наиболее распространены в дорожной отрасли изделия ***грубой строительной керамики*** (пористые изделия с водопоглощением более 5 %):

- стеновые керамические материалы (керамический кирпич и камни);
- клинкерный (дорожный) кирпич;
- керамические канализационные и дренажные трубы.

Стеновые керамические изделия предназначены для возведения несущих наружных и внутренних стен и других элементов зданий и сооружений. К ним относятся:

- керамический рядовой (обыкновенный) кирпич;
- эффективный кирпич и керамические камни.

6.2.2. Сырьевые материалы

Для производства строительных керамических изделий используют сырьевые смеси, состоящие из *пластичного*, или основного сырья (глинистого), и *непластичного*, или добавочного, к которому относят отощающие, выгорающие добавки, плавни и др.

Глинами называют осадочные породы, образовавшиеся в результате глубокого выветривания (разрушения под воздействием физических, химических и биологических процессов) полевошпатовых горных пород — гранита, сиенита, гнейса и др.

Глины, оставшиеся на месте образования, называют первичными. Обычно они засорены примесями породы, из которой образовались.

Вторичными (*переотложенными*) называют глины, перенесенные и отложенные в других местах. Такие глины наиболее распространены в природе.

Глины состоят из глинообразующих минералов (водных алюмосиликатов) со слоистой кристаллической структурой:

- каолинита $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$;
- монтмориллонита $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$ и др.

Глинистые минералы определяют основную способность глины — образовывать с водой пластичное тесто, которое в процессе высыхания сохраняет приданную ему форму и после обжига приобретает свойства камня.

Пластичность — свойство глиняного теста деформироваться под нагрузкой без образования трещин и разрывов и сохранять приданную форму после снятия этой нагрузки. В соответствии с ГОСТ 30672–99 пластичность глин выражается *числом пластичности*

$$П = W_1 - W_2\ (\%), \qquad (6.1)$$

где W_1 — влажность, при которой глина переходит из пластичного состояния в текучее, — *нижняя граница текучести*; W_2 — влажность, при которой глина переходит из пластичного состояния в хрупкое, — *граница раскатывания*.

В зависимости от пластичности все глины подразделяются на высокопластичные с числом пластичности более 25; среднепластичные — 15...25; умеренно пластичные — 7...15; малопластичные — до 7; непластичные — не способные при затворении водой давать пластичное тесто.

Глинистые минералы при смачивании водой набухают вследствие того, что поглощаемая ими вода располагается между отдельными слоями их кристаллических решеток; при этом межплоскостные расстояния решеток значительно увеличиваются. При сушке глин происходит обратный процесс, сопровождающийся усадкой.

Под ***воздушной усадкой*** (линейной или объемной) понимают уменьшение линейных размеров и объема образца из глиняного теста при высыхании. Воздушная усадка тем больше, чем выше пластичность глины.

При обжиге глин после удаления гигроскопической влаги и выгорания органических примесей происходит разложение глинистых минералов. Так, каолинит при температуре 500...600 °С теряет химически связанную воду; при этом процесс протекает с полным распадом кристаллической решетки и образованием аморфной смеси глинозема Al_2O_3 и кремнезема SiO_2. При дальнейшем нагреве до 900...950 °С возникают новые кристаллические силикаты (например, муллит $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) и образуется некоторое количество расплава (жидкой фазы) вследствие плавления наиболее легкоплавких минералов, входящих в состав обжигаемых глиняных масс.

В процессе обжига под действием сил поверхностного натяжения жидкой фазы твердые частицы обжигаемого материала сближаются и объем его уменьшается, т.е. происходит огневая усадка. ***Огневой усадкой*** (линейной или объемной) называется уменьшение линейных размеров и объема высушенных глиняных образцов в процессе обжига.

Термические свойства глин характеризуют изменения, происходящие в них при высоких температурах. Они определяются огнеупорностью и спекаемостью.

Огнеупорностью называют свойство глин выдерживать действие высоких температур, не расплавляясь. По огнеупорности глины делятся:

- на огнеупорные — огнеупорность выше 1580 °С;
- тугоплавкие — огнеупорность 1350...1580 °С;
- легкоплавкие — огнеупорность менее 1350 °С.

Огнеупорность глин зависит от химического состава. Повышенное содержание глинозема (Al_2O_3) увеличивает огнеупорность.

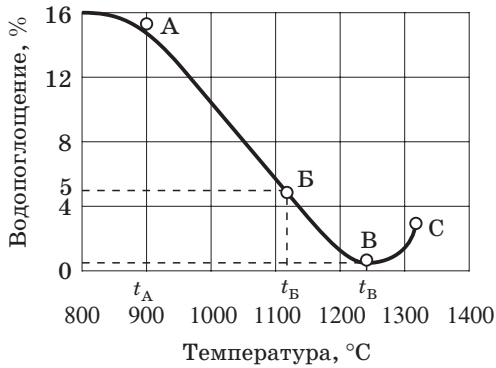


Рис. 6.6. Зависимость водопоглощения керамического материала от температуры обжига:
$t_А$ — температура начала спекания; $t_Б$ — температура, при которой водопоглощение черепка 5 %; $t_В$ — температура, выше которой отмечаются признаки пережога; $t_А - t_В$ — интервал спекания; $t_Б - t_В$ — интервал спекшегося состояния

Свойство глин при обжиге уплотняться с образованием камнеподобного материала называется ***спекаемостью***. Это свойство глин характеризуется *интервалами спекания* и *спекшегося состояния*, находящимися в тесной зависимости от водопоглощения керамического материала (рис. 6.6).

Способность глины при обжиге переходить в камневидное состояние, в котором она совершенно не размокает в воде, объясняется следующим. При обжиге протекают химические и физико-химические процессы (удаление кристаллизационной воды, частичное разложение безводной глины на оксиды и образование новых водостойких и тугоплавких соединений), приводящие к изменению структуры глины. Частицы обезвоженной и видоизмененной глины спекаются, не переходя при этом полностью в расплавленное состояние. Спекание происходит за счет плавления легкоплавких примесей. Этот расплав склеивает, цементирует всю массу.

Для производства керамических изделий нужна смесь, которая хорошо формируется и достаточно быстро сохнет. Смесь с оптимальным соотношением глинистых и песчаных частиц получают, добавляя в жирную глину отощающие добавки: квар-

цевый песок, золу ТЭС, шамот (глина, обожженная при температуре 900...1400 °С и потерявшая пластические свойства), измельченный бой готовых изделий. Для улучшения спекания керамического черепка при обжиге и для снижения температуры обжига изделий вводят флюсы или плавни (стеклобой, полевые шпаты, вулканические породы, нефелиновые конценраты).

Для получения изделий с меньшей средней плотностью и повышенной пористостью применяют *органические выгорающие добавки* (древесные опилки, угольная мелочь, торфяная пыль, полистирольный бисер и др.). Используют также вещества, выделяющие при высокой температуре обжига углекислоту, что ведет к образованию пор (молотые мел, доломит и глинистый мергель). Эти добавки обладают также свойствами отощающих добавок.

6.2.3. Керамический рядовой (обыкновенный) кирпич

Керамический кирпич —искусственный камень в форме прямоугольного параллелепипеда. Он является самым древним искусственным строительным материалом и на протяжении долгих лет практически не изменил ни формы, ни фактуры (характера поверхности). Машинные способы производства позволяют выпускать кирпич различных модификаций, что улучшает внешний вид зданий и их интерьер. Современные размеры кирпича были утверждены стандартом в 1927 г. Общемирового стандарта кирпича не существует, однако его размеры и масса лимитируются размером и силой человеческой руки.

Керамический кирпич может быть *полнотелым* и *пустотелым* (рис. 6.7).

Керамический кирпич выпускают следующих основных размеров:

- рядовой (обыкновенный) 250 × 120 × 65 мм;
- модульный 288 × 138 × 63 мм;
- утолщенный 250 × 120 × 88 мм.

Поскольку масса одного кирпича не должна превышать 4,3 кг, утолщенный и модульный кирпич обычно делают с пустотами для снижения его массы и увеличения теплоизоляционных свойств.

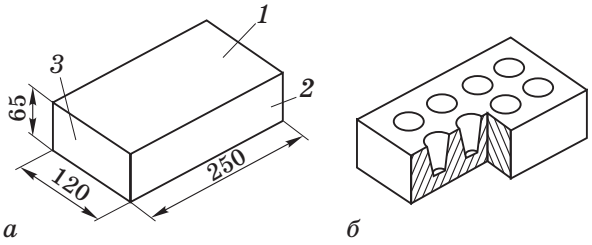


Рис. 6.7. Керамический обыкновенный кирпич: *а* — полнотелый (*1* — плашок; *2* — ложок; *3* — тычок); *б* — пустотелый

Плотность полнотелого керамического кирпича составляет 1600…1900 кг/м^3, водопоглощение — не менее 8 %.

По прочности на сжатие и изгиб по СТБ 1160–99 его подразделяют на восемь марок от 75 до 300 (табл. 6.2), по морозостойкости — на шесть марок: F15, F25, F35, F50, F75, F100.

Таблица 6.2

Марки керамического кирпича

Марка кирпича	Предел прочности (средний для пяти образцов), МПа (не менее)			
	на сжатие для всех видов изделий	на изгиб, формование		
		пластического для полнотелого кирпича	полусухого прессования для пустотелого кирпича	пустотелого утолщенного кирпича
300	30,0	4,4	3,4	2,9
250	25,0	3,9	2,9	2,5
200	20,0	3,4	2,5	2,3
175	17,5	3,1	2,3	2,1
150	15,0	2,8	2,1	1,8
125	12,5	2,5	1,9	1,6
100	10,0	2,2	1,6	1,4
75	7,5	1,8	1,4	1,2

Производство. Обыкновенный керамический кирпич изготовляют из легкоплавких глин (число пластичности 7…15, огневая усадка не более 3,5 %), содержащих 40…50 % песка.

Технологический процесс изготовления изделий в общем случае состоит из четырех операций:

Рис. 6.8. Технологическая схема производства керамического кирпича пластическим способом

1) карьерные работы по добыче глины;
2) обработка глиняной массы;
3) формование изделий;
4) сушка и обжиг изделий.

Отдельной операцией является подготовка добавок.

В зависимости от способа формования кирпича различают два способа: *пластический* (мокрый) и *полусухой*.

При *пластическом способе* (рис. 6.8) глина измельчается, а влажность ее доводится до 18...23 %. Затем она тщатель-

но перемешивается и формуется в четырехгранный брус, который затем с помощью резательного устройства делится на кирпич-сырец. Прессование производят при 4...9 МПа (первая ступень) и 30 МПа (вторая ступень). Сушка сырца производится при температуре до 90 °С в сушилках периодического или непрерывного действия в течение 1–3 сут. После этого сырцовый кирпич обжигается в туннельной печи: высушенный до остаточной влажности 4...6 % кирпич-сырец, уложенный на вагонетки, непрерывно движется вдоль печи навстречу горячим газам и последовательно проходит зоны подогрева, обжига и охлаждения.

Полусухой способ производства кирпича отличается от пластического тем, что прессование кирпича производят из сильно отощенных жестких масс (малопластичной глины) влажностью 6...8 % на гидравлических прессах (прессование начинают от 4...9 МПа (первая ступень) до 25...30 МПа (вторая ступень). Полный цикл прессования составляет 10 с. Отпрессованные сырцовые изделия не требуют сушки — их можно обжигать сразу после формования.

Сортировка и хранение. При выгрузке из печи керамические кирпичи сортируют. Качество изделий устанавливают по степени обжига, внешнему виду, форме, размерам, а также по наличию в них различных дефектов в соответствии с требованиями нормативных документов.

У керамических изделий встречается скрытый дефект — ***дутик***, который может проявиться только после того, как кирпич достаточное время находился во влажном состоянии. В этом случае происходят выколы и разрушение поверхности. В месте откола хорошо виден белый порошок или белая тестообразная масса. Причина такого дефекта — некачественное перетирание сырьевой смеси. Если в исходном сырье встречаются куски известняка или другой карбонатной породы, то, если не измельчить сырьевую массу достаточно тонко, в свежеотформованном изделии могут оказаться кусочки известняка размером 1...5 мм. При обжиге они превращаются в оксид кальция (негашеную известь)

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2\uparrow.$$

Негашеная известь при контакте с водой превращается в гидроксид кальция («гасится») с увеличением в объеме, что приводит к выколам и разрушению изделий.

Строительный кирпич, как правило, перевозят на деревометаллических поддонах, на которые кирпич укладывают на ребро (перевозить кирпич навалом запрещается, так как при этом много кирпича бьется). Хранят поддоны с кирпичом на открытых площадках (или под навесом), желательно в полиэтиленовой упаковке.

Кирпич керамический рядовой применяют для кладки внутренних и наружных стен, столбов, сводов и других частей зданий — там, где необходима высокая прочность.

Кирпич полусухого прессования нельзя применять для кладки цоколей, фундаментов и наружных стен влажных помещений.

6.2.4. Эффективный кирпич и керамические камни

Обыкновенный керамический кирпич обладает двумя существенными недостатками: у него относительно высокая средняя плотность (более 1600 кг/м^3) и небольшие размеры. Для снижения плотности и теплопроводности изготовляют кирпич с пустотами (рис. 6.9) или увеличивают его пористость (например, введением в глину выгорающих добавок). Таким образом получают пустотелый, пористый и пористо-пустотелый кирпич.

Применение таких кирпичей позволяет уменьшить толщину стен и сократить расход материалов, поэтому их называют ***эффективными***.

Объем пустот в пустотелом кирпиче 13...33 %, водопоглощение по массе — не менее 6 %. Марки пустотелого кирпича такие же, как и полнотелого (см. табл. 6.2); марка по морозостойкости — не менее F15.

Из пустотелого кирпича возводят наружные и внутренние стены зданий. Каждый квадратный метр стены из пустотелого кирпича на 200...300 кг легче, чем из полнотелого. Это не только улучшает теплозащитные свойства стены, но и уменьшает расход основных строительных материалов (кирпича, цемента, стали). Пустотелый кирпич нельзя применять для

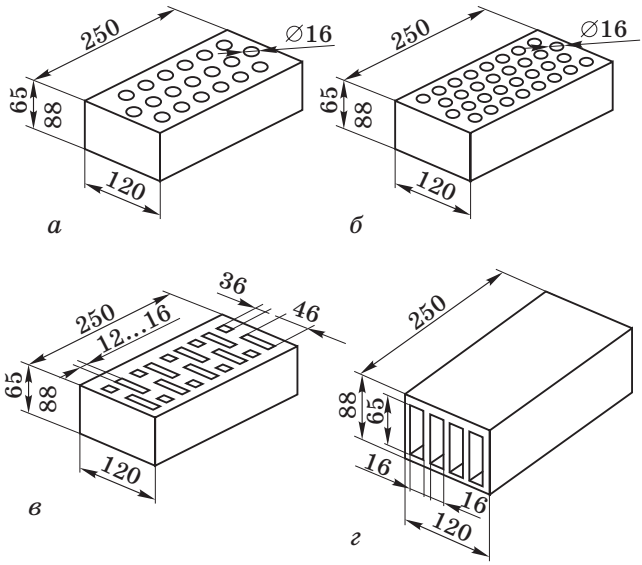


Рис. 6.9. Керамический пустотелый кирпич с 19 (*а*), 32 (*б*) и 18 (*в*) вертикальными пустотами разного профиля и с 4 горизонтальными пустотами (*г*)

возведения цоколей, фундаментов, подземных сооружений и несущих конструкций.

Для увеличения размеров керамических стеновых изделий производят пустотелые керамические камни (табл. 6.3).

Таблица 6.3

Номинальные размеры пустотелых керамических камней, мм

Вид изделия	Длина	Ширина	Толщина
Камень модульных размеров	288	138	138
Камень модульных размеров укрупненный	288	288	88
Камень укрупненный	250 250 180	250 250 250	138 188 138
Камень укрупненный с горизонтальным расположением пустот	250 250	250 200	120 80

Формование крупноразмерных керамических камней со сквозными пустотами не только снижает плотность и массу изделий, но и ускоряет процессы их сушки и обжига, так как изделие прогревается быстрее и равномернее через наружные и внутренние поверхности. Поэтому пустотелый кирпич и камни имеют меньше дефектов, а их прочность, несмотря на большой процент пустот (до 37 %), такая же, как прочность обыкновенного кирпича.

6.2.5. Клинкерный (дорожный) кирпич

Клинкерный кирпич — это кирпич, обожженный до полного спекания без оплавления поверхности. Его применяют для устройства дорожных и тротуарных покрытий, полов, фундаментов, для облицовки, в гидротехнических сооружениях.

Клинкерный (дорожный) кирпич изготовляют из тугоплавких глин с их обжигом до полного спекания. Он имеет меньшие размеры ($220 \times 110 \times 65$ мм или $220 \times 110 \times 75$ мм), чем обыкновенный стеновой кирпич, низкое водопоглощение (2…6 %), высокую прочность при сжатии (40…100 МПа), морозостойкость не менее F100, плотность — не менее 1900 кг/м^3.

Технологический процесс изготовления клинкерного кирпича схож с технологией производства стенового кирпича пластическим способом.

6.2.6. Керамические канализационные и дренажные трубы

Керамические трубы подразделяются на канализационные и дренажные.

Канализационные трубы производят цилиндрической формы длиной 800…1200 мм с внутренним диаметром от 100 до 600 мм (десять размеров с шагом 50 мм). На одном конце имеется раструб для соединения отдельных звеньев трубопровода. Трубы должны выдерживать гидравлическое давление не менее 0,2 МПа и внешнюю нагрузку 0,2…0,3 кН на 1 м длины.

Основным сырьем для производства канализационных труб служат пластичные тугоплавкие глины, которые дают общую усадку изделий не более 8 %.

Керамические ***дренажные трубы*** выпускаются с внутренним диаметром 50…250 мм и длиной 3000 мм. Наружная поверхность может быть цилиндрической, шести- или восьмигранной. Марка по морозостойкости должна быть не менее F15.

Сырьем для их производства служат малопластичные и пластичные глины. Для повышения пористости черепка вводят выгорающую добавку — тонкомолотый уголь. Формуют трубы методом пластического прессования.

Дренажные трубы применяют для понижения уровня, сбора и отвода грунтовых вод.

6.3. Искусственные заполнители на основе глинистого сырья для легких и тяжелых бетонов

Искусственные заполнители – сыпучие материалы, полученные термической обработкой силикатного сырья. Они подразделяются:

- на пористые (керамзит, аглопорит, вспученный перлит и др.);
- плотные (керамдор, литой шлаковый щебень).

6.3.1. Искусственные пористые заполнители для легких бетонов и теплоизоляционных засыпок

Среди пористых заполнителей наибольшее распространение получил ***керамзит*** искусственный пористый материал, полученный из глины или глинистых сланцев, способных вспучиваться при температуре обжига 1100…1200 °С. Принципиальная технологическая схема производства керамзита пластическим способом показана на рис. 6.10.

Глины, из которых получают керамзит, содержат 16…25 % оксидов алюминия, 6…12 % оксидов железа, 2…3 % щелочных оксидов и до 3 % органических примесей.

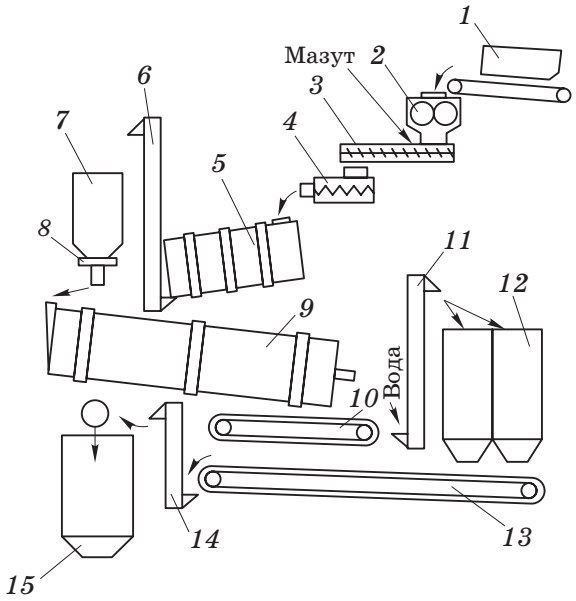


Рис. 6.10. Технологическая схема производства керамзита пластическим способом:
1 — ящичный питатель глины; *2* — камневыделительные вальцы; *3* — двухвальный смеситель; *4* — шнековый пресс с перфорированным цилиндром; *5* — сушильный барабан; *6* — элеватор; *7* — бункер сухих гранул; *8* — тарельчатый гранулятор; *9* — вращающаяся печь 2,5 × 40 м; *10* — пластинчатый транспортер; *11* — элеватор; *12* — бункеры учета готовой продукции; *13* — ленточный транспортер; *14* — гравиесортировка; *15* — силос для готовой продукции

В результате обжига шихты во вращающейся печи получают *керамзитовый гравий* следующих фракций: 5…10, 10…20, 20…40 мм. *Керамзитовый песок* (размер зерна менее 5 мм) получают обжигом мелких фракций или дроблением и рассевом керамзитового гравия. Его зерна имеют округлую или эллипсовидную форму, оплавленную поверхность и пористую ячеистую структуру. Это легкий, прочный и морозоустойчивый материал с хорошими теплоизоляционными свойствами.

Ведущим показателем качества керамзита является его малая насыпная плотность: от 250 до 600 кг/м^3. Предел прочности при сжатии находится в интервале от 0,6 до 3 МПа.

Используется керамзитовый гравий для получения легких цементных бетонов, а также в качестве тепло- и звукоизоляционных засыпок в конструкциях зданий.

Аглопорит — искусственный пористый материал, получаемый спеканием топливосодержащего сырья (шихты) в результате его послойного обжига в агломерационных машинах при температуре 1050...1300 °С. Спекание происходит при горении топлива в слое сырья с интенсивным просасыванием воздуха через него.

В качестве сырья используют глину, суглинок, супесь и другие материалы, в которые вводятся для вспучивания горючие добавки — древесные опилки, дробленый до 5 мм каменный уголь (до 8...15 %), нефть. Если сырье сухое, то добавляется вода.

Шихта слоем 200...300 мм загружается на конвейерную колосниковую решетку агломерационной машины. К верхнему слою подводят горелку (горн), одновременно обеспечивая просос воздуха через слой шихты. При этом шихта подсушивается. Когда она подогревается до температуры воспламенения топлива, начинается его горение и температура в слое достигает 1400...1600 °С. При этом происходит контактное спекание между зернами, а горение переходит в нижележащий слой. В результате образуется аглопоритовый корж, который дробится на щебень, а при необходимости сортируется с рассевом на фракции (рис. 6.11).

Основное количество пор аглопорита — это крупные сообщающиеся поры (пути просасывания воздуха) диаметром 0,5...2 мм.

Аглопоритовые щебень и песок применяют в качестве заполнителей легких бетонов. Прочность аглопоритобетона несколько выше, чем керамзитобетона, при одинаковой средней плотности. Поэтому аглопорит целесообразно применять для облегченных конструктивных бетонов.

Аглопоритобетон с пределом прочности 20...30 МПа (иногда до 50 МПа), идет на изготовление предварительно напряженных железобетонных конструкций перекрытий больших пролетов, ферм, мостовых пролетных строений. Замена в этих конструкциях тяжелого бетона легким аглопоритобетоном значительно повышает их эффективность.

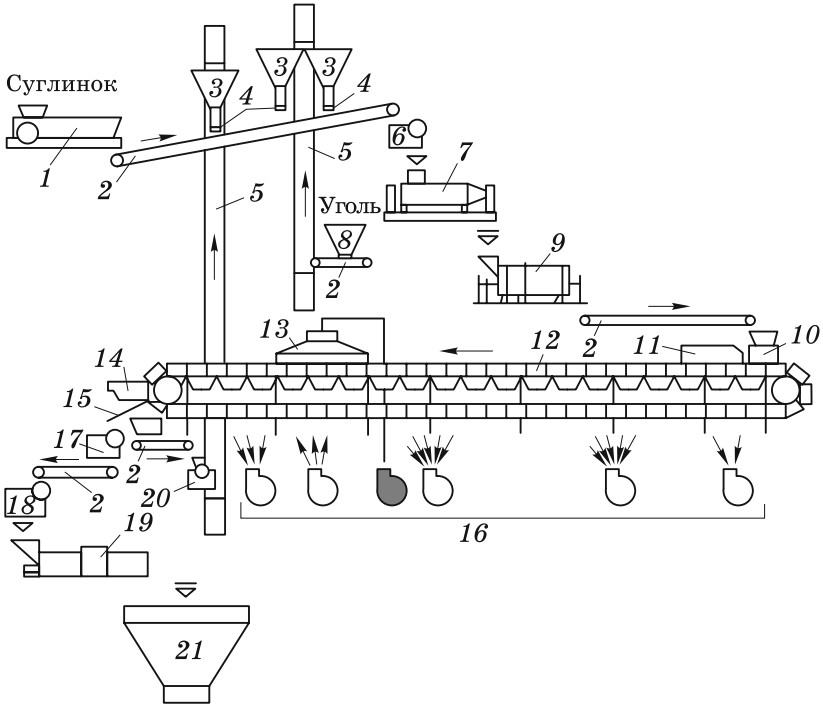


Рис. 6.11. Технологическая схема производства аглопорита из глинистых пород:

1 — ящичный подаватель с дробильным устройством; *2* — ленточный транспортер; *3* — бункер; *4* — питатель; *5* — элеватор; *6* — камневыделительные вальцы; *7* — смеситель одновальный с уплотняющей головкой; *8* — бункер топлива; *9* — гранулятор барабанный; *10* — питатель агломерационной решетки; *11* — горн; *12* — ленточная агломерационная машина; *13* — коробка верхнего отсоса; *14* — агрегат для помола песка; *15* — вибрационная выбивная решетка; *16* — вентиляторы; *17* — дробилка роторная первичного дробления; *18* — грохот барабанный; *19* — дробилка валко-зубчатая; *20* — дробилка молотковая; *21* — склад аглопорита

6.3.2. Искусственные плотные заполнители для дорожных асфальтобетонов и тяжелых цементобетонов

Типовым представителем плотных заполнителей для дорожных бетонов является ***клинкерный щебень*** (***керамдор***). Его получают обжигом до полного спекания во вращающихся печах изготовленных пластическим способом гранул из глинистых масс или путем дробления штучного клинкера до крупности зерен менее 70 мм.

Для производства керамического щебня используют легкоплавкие глины и суглинки (с отощающими добавками) с числом пластичности не менее 7, содержанием свободного кремнезема не менее 20 %, не вспучивающиеся при обжиге, обладающие интервалом спекания не менее 60 °С. Зерна клинкерного щебня имеют плотное сложение, слабошероховатую поверхность и острые ребра. Средняя плотность зерен щебня должна быть не менее 2000 кг/м^3, водопоглощение — не более 5 %, прочность на сжатие при сдавливании в цилиндре 100…120 МПа, морозостойкость — более F100.

Клинкерный щебень применяют в качестве крупного и мелкого заполнителя в дорожных асфальто- и цементобетонах.

6.4. Материалы из расплавов неорганических сырьевых масс

Материалы из расплавов неорганических сырьевых масс представляют собой охлажденные с различной скоростью специально изготовленные композиции. К ним относятся:

- стекло строительное листовое и стеклянные изделия;
- ситаллы;
- плавленые каменные материалы и изделия (каменное литье);
- изделия из шлакового литья.

Указанные материалы находят широкое применение как в промышленно-гражданском, так и в дорожном строительстве.

6.4.1. Материалы и изделия из стеклянных расплавов и ситаллы

Стекло представляет собой переохлажденный расплав сложного состава. Это изотропный и хрупкий материал аморфного строения. Для его изготовления применяют:

- чистые кварцевые пески;
- кальцинированную соду;
- известняк (мел).

Строительное стекло относится к группе силикатных стекол, в составе которых содержится до 80 % кремнезема. Оконное стекло имеет следующий химический состав (%): SiO_2 — 70...72; CaO — 10...12; MgO — 3...4; $Al_2O_3 + Fe_2O_3$ — 1...3; Na_2O — 1,4...15; K_2O — 1...2.

Качество стекла характеризуется следующими показателями:

- плотность — 2500...2700 кг/м^3;
- предел прочности: на сжатие — 500...1000 МПа; на растяжение — 30...60 МПа (трещины, царапины снижают прочность при растяжении в 4–5 раз); на изгиб — 35...85 МПа;
- твердость по шкале Мооса — 5…7;
- теплопроводность — 0,5…1 Вт/(м·К);
- температура размягчения — 500…700 °С;
- светопропускание (прозрачность) — 88 %;
- практически не пропускает ультрафиолетовые и инфракрасные лучи.

Недостатком стекла является его повышенная хрупкость (прочность при ударном изгибе составляет всего около 0,2 МПа).

В состав некоторых строительных стекол для улучшения их строительно-технических свойств вводят оксиды бора (повышает термостойкость), алюминия (увеличивает прочность и химическую стойкость), свинца и бария (придают блеск и повышают коэффициент преломления).

Листовое стекло. Получение листового стекла складывается из следующих операций:

1) подготовка сырьевой шихты;

2) расплавление шихты в стекловаренных печах при температуре 1400...1600 °С с образованием стекломассы требуемой вязкости;

3) формование листа из расплавленной стекломассы путем непрерывного вытягивания ленты и отрезания от одного ее конца после затвердения стекла листов требуемых размеров;

4) термическая, механическая или химическая обработка для улучшения строительно-технических свойств стекла.

Варка стекла — процесс многостадийного превращения шихты в жидкую стекломассу. При нагревании стекольной шихты происходят сложные физические, химические и физико-химические процессы. При этом выделяют следующие стадии стекловарения:

- силикатообразование (1100...1150 °С);
- стеклообразование (1150...1250 °С);
- осветление (дегазация);
- гомогенизация (1450...1600 °С);
- охлаждение (1200...1300 °С).

На последнем этапе идет подготовка стекломассы к формованию.

Листовое светопрозрачное стекло варят в ванных печах непрерывного действия.

Формование стекла производят различными способами, среди которых основными являются два: вытягивание и флоат-способ (на расплаве металла).

Флоат-способ — это новейший прогрессивный способ производства листового стекла.

Его особенность заключается в том, что формование происходит на поверхности расплавленного металла (олова) (рис. 6.12). Нижняя поверхность ленты стекломассы получается ровной и гладкой за счет контакта с идеально ровной поверхностью расплавленного металла, а верхняя — под действием сил поверхностного натяжения самой стекломассы (идет огневая полировка).

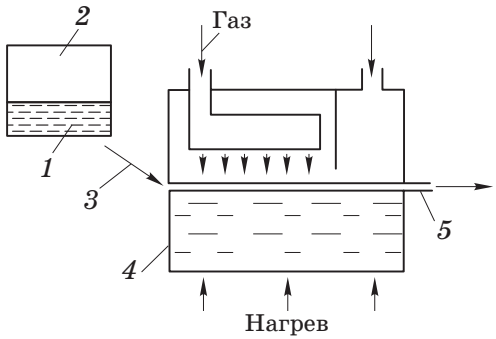


Рис. 6.12. Схема формования листового стекла на расплаве металла:
1 — стекломасса; *2* — газовое пространство; *3* — слив; *4* — ванна с расплавом металла; *5* — лента стекла

Флоат-способ отличается максимальной производительностью и высоким качеством вырабатываемой продукции. Скорость формования ленты толщиной 5 мм достигает 500 м/ч, толщиной 3 мм — до 800 м/ч. Управляют всем процессом при помощи ЭВМ.

После охлаждения (до 600 °С) стеклолента поступает на ***термическую обработку***, к которой относят отжиг и закалку. *Отжиг* заключается в медленном охлаждении стекла по заданному режиму. Цель этой операции — предотвратить возникновение в материале больших внутренних напряжений при последующем быстром охлаждении на воздухе. *Закалку* производят для повышения прочности стекла. Она заключается в быстром охлаждении (обдувании воздухом) листов, предварительно нагретых до 600...650 °С.

Закаленное листовое стекло, иначе называемое *сталенитом*, обладает повышенной механической прочностью и термической стойкостью, при разрушении образует осколки с нережущими краями; оно применяется для остекления витрин, дверей и т.п.

К разновидностям ***механической обработки*** листового стекла относят *шлифовку* и *полировку*.

Одним из видов ***химической обработки*** листового стекла является его *травление* газообразным фтористым водородом или растворами плавиковой кислоты и ее солей с целью получения матовой поверхности.

Листовое стекло подразделяется на неполированное и полированное; обычное (отожженное) и закаленное (сталенит); бесцветное и цветное; плоское, волнистое и гнутое.

В строительстве наиболее широко применяют *листовое неполированное бесцветное стекло*. Выпускается оно в виде листов толщиной 2; 2,5; 3; 4; 5 и 6 мм, длиной 250...2200 мм, шириной 250...1600 мм. Масса 1 $м^2$ стекла менее 2...5 кг. Оконное стекло пропускает не менее 87 % лучей видимой части солнечного спектра и применяется для остекления световых проемов зданий и сооружений.

Путем специальной механической обработки — шлифовки и полировки, в результате которой удаляются все поверхностные пороки (полосность и др.), получают *листовое полированное стекло*, обладающее меньшими, чем обычное оконное стекло, оптическими искажениями. Такое стекло применяют там же, где и обычное оконное стекло, а также для остекления наружных и внутренних витрин и больших проемов в кинотеатрах, клубах, выставочных залах, аэропортах, вокзалах и т.п.

Для повышения прочности листовое стекло армируют металлической сеткой, которую укладывают внутри листа параллельно его поверхности в процессе получения методом непрерывного проката. *Армированное стекло* при разрушении ударом или при растрескивании при пожарах не рассыпается на выпадающие куски. Его применяют в тех случаях, когда к стеклу предъявляются повышенные требования по огнестойкости и безопасности, например для остекления световых фонарей, лифтовых шахт, ограждения лестничных клеток и т.п.

Для остекления световых проемов дверей и перегородок в помещениях, где требуется рассеянный свет, используют *узорчатое листовое стекло*, на одну или обе поверхности которого в процессе прокатки нанесли рельефный рисунок. Узорчатое листовое стекло выпускают бесцветным и цветным.

При обработке поверхности листа струей песка при помощи пескоструйного аппарата получают *матовые стекла*. Они обеспечивают светорассеивание и ухудшают видимость.

Изделия из стекла. К ним относятся пустотелые стеклянные блоки, катафот, стеклопрофилит, стеклопакеты, пеностекло, стекловата.

Пустотелые стеклянные блоки выпускают шести- и четырехгранной формы. Их применяют как вставки при кладке наружных стен в оконных проемах, в просветах железных решеток и др.

Катафот состоит из стеклянной полусферической линзы, зажима и отражателя. Их помещают в обойму из тонкого алюминиевого листа, которую вставляют в отверстие щитового дорожного знака. Отражатель состоит из сплавленных мелких шариков и эффективно отражает свет фар автомобиля, информируя водителя о дорожной обстановке. Катафоты бывают диаметром 20, 28 и 51 мм. Они могут быть бесцветными или цветными.

Стеклопрофилит (***профильное стекло***) представляет собой элементы швеллерного или коробчатого сечения из бесцветного или окрашенного стекла длиной 6 м, шириной 25...50 см; толщина стекла 5...6 мм. Стеклопрофилит применяют для устройства прозрачных ограждений павильонов автобусных остановок, внутренних перегородок в помещениях. Светопропускная способность профильного строительного стекла 40...70 %.

Стеклопакеты состоят из двух плоских стекол, склеенных по периметру так, что между ними образуется замкнутое пространство, заполненное воздухом.

Пеностекло — стекло с ячеистой (пористой) структурой; диаметр пор — 0,1...5 мм. Различают пеностекло с замкнутыми порами (теплоизоляционное), сообщающимися (звукопоглощающее), частично замкнутыми (строительно-изоляционное).

Пеностекло характеризуется малой плотностью, низкими теплопроводностью и водопоглощением, огнестойкостью,

морозостойкостью и стойкостью к химическим агрессивным средам.

Пеностекло изготовляют плотностью 100...700 кг/м^3, причем 90 % его производства приходится на долю легкого (до 250 кг/м^3), в котором газовая фаза занимает свыше 90 % объема.

Механическая прочность пеностекла увеличивается с повышением его плотности. Предел прочности на сжатие пеностекла плотностью 200...400 кг/м^3 составляет 2...6 МПа, а коэффициент теплопроводности изменяется от 0,055 до 0,13 Вт/(м · К).

Сырьем для производства пеностекла служит смесь тонкоизмельченной стекольной шихты или стеклобоя с порообразователями, которые при высокой температуре выделяют газ, вспучивающий стеклянную массу. При получении пеностекла с замкнутыми порами применяют углеродосодержащие порообразователи (кокс, сажу, торфяной полукокс, карбид кремния и т.д.). Для получения пеностекла с сообщающимися порами используют мрамор, доломит и др.

Технологический процесс производства пеностекла (в виде блоков, плит, деталей, крошки) состоит из приготовления исходной смеси, вспенивания, обжига, отжига заготовок и механической обработки. Вспенивают стекло при температуре 700...800 °С для обычного стеклянного порошка или 900...1250 °С для порошков стекла и стеклокристаллических композиций, полученных из глины, нерудных ископаемых, отходов производства или горных пород. Вспенивание стекла и отжиг блоков из него осуществляется в одной или двух различных печах. Пеностекло легко поддается механической обработке: его пилят, режут, сверлят.

Пеностекло применяют в строительстве в качестве тепло- и звукоизоляционного материала.

Стекловата — вид стеклянного волокна. Это теплоизоляционный волокнистый материал, получаемый при дутьевом или центробежном способе в виде тонких нитей (диаметр 5...15 мкм) небольшой длины (5...60 мм).

Технология получения стекловаты фильерным способом состоит в том, что из расплава стекла через отверстия (фильe-

ры) в платиновой пластине вытягивают тонкие прочные нити, которые, охлаждаясь, затвердевают.

Плотность стекловаты колеблется в пределах 20...200 кг/м^3; коэффициент теплопроводности — 0,041...0,052 Вт/(м · К).

Из стекловаты изготовляют теплоизоляционные изделия (маты, полосы, плиты, скорлупы), в которых стеклянные волокна соединяются между собой с помощью вяжущих материалов.

Ситаллы. ***Ситаллами*** называют закристаллизованные стекла с мелкокристаллической структурой, впервые полученные в СССР профессором И.И. Китайгородским путем введения в расплав стекла кристаллических затравок (катализаторов): оксидов титана (TiO_2), циркония (ZrO_2) и др.

Получен также мелкокристаллический материал из огненно-жидких шлаков, названный ***шлакоситаллом***.

Производство ситаллов состоит из трех этапов:

1) варка стекла из шихт, содержащих катализаторы кристаллизации;

2) формование изделий;

3) термическая обработка отформованных изделий в печах-кристаллизаторах для получения мелкокристаллической структуры.

Нагрев и выдерживание изделий осуществляют при температуре, соответствующей образованию центров кристаллизации (в шлакостеклянной массе равномерно распределены кристаллы размером 0,01...0,1 мкм). Шлакоситаллы состоят из 50...90 % кристаллической фазы и 10...50 % стекловидной. Изменяя время и температуру термообработки, можно получать кристаллы необходимых размеров и нужное количество кристаллической фазы.

Технология получения листового шлакоситалла показана на рис. 6.13.

По сравнению с обычными стеклами ситаллы обладают значительно большей прочностью и термической стойкостью (табл. 6.4).

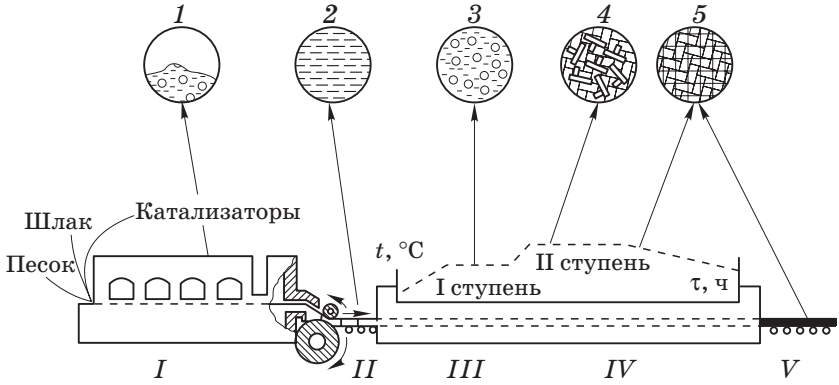


Рис. 6.13. Схема получения листового шлакоситалла методом непрерывного проката:
1 — расплав стекломассы; *2* — отформованная лента стекла; *3* — стекло с центрами (зародышами) кристаллизации; *4* — стеклокристаллический материал «волластонит-стеклофаза»; *5* — то же «волластонит-анортит-стеклофаза»; *I* — варка стекла; *II* — непрерывный прокат стекла; *III* — кристаллизация; *IV* — отжиг; *V* — листовой шлакоситалл

Таблица 6.4

Физико-механические свойства шлакоситалла и стекла

Материал	Плотность, кг/м^3	Предел прочности на изгиб, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа	Предел прочности на растяжение, МПа
Стекло	2500	30…100	500...1000	30...60
Шлакоситалл	2600	1000	1000...1600	25...50

Шлакоситаллы обладают высокой стойкостью к истиранию (0,013...0,03 г/см^2), химически стойки.

Ситаллы могут быть черной, желтой и белой окраски, что позволяет применять их для изготовления дорожной вертикальной разметки.

Листовые шлакоситаллы применяют для наружной и внутренней обработки стен, колонн, покрытий полов в помещениях с агрессивной средой.

Дробленый ситалл белого цвета (дорсил) используют как щебень для асфальтобетона с улучшенными светоотражающими свойствами при устройстве дорожных покрытий в местах, требующих особого внимания водителей (например, участки в местах перехода людей через дорогу или при устройстве волнистых конструкций на проезжей части — «лежащий полицейский»).

6.4.3. Плавленые каменные материалы (каменное литье)

Каменное литье — это искусственный материал, получаемый расплавлением горных пород при 1400...1500 °С с последующей тепловой обработкой разлитого по формам расплава. После охлаждения для снижения напряжений и образования кристаллической структуры изделия отжигают при температуре 800...900 °С.

Ввиду высокой химической стойкости, долговечности, прочности ($R_{сж}$ = 300...400 МПа, $R_{изг}$ = 40...60 МПа), низкой истираемости (истираемость плавленых материалов составляет 0,7 г/см^2, т.е. в 2–5 раз меньше, чем гранита и базальта) и разнообразия расцветок из каменного литья изготавливают простые и сложные изделия для цокольных частей зданий, карнизных и балконных плит, различные рельефные изделия.

В зависимости от сырья и цвета различают: *темное* каменное литье — из вулканических горных пород (базальт и диабаз — 88 %) и металлургических шлаков (12 %) — и *светлое* — из кварцевого песка и осадочных горных пород (кварцевый песок — 46 %, доломит — 32 %, известняк — 22 %).

Темнолитые изделия используют как антикоррозийное покрытие пола, светлолитые — для облицовки стен зданий.

Ввиду высокой морозостойкости и химической стойкости камнелитые изделия эксплуатируются в особо тяжелых условиях (например, плитки для полов используют в цехах с агрессивными средами, в дорожном строительстве).

Плавленые каменные изделия применяют для трубопроводов и лотков сыпучих материалов, для футеровки шаровых

мельниц, при строительстве резервуаров для агрессивных веществ, для элементов сооружений, где необходимы большая прочность и износостойкость. Поэтому основными видами изделий, выпускаемых камнелитейными заводами, являются дорожная брусчатка, облицовочные плитки, трубы.

В дорожном строительстве находит применение плавленый каменный материал, обладающий высокими светоотражательными свойствами, — ***синопал***, который представляет собой щебень белого цвета, изготовленный плавлением и последующей кристаллизацией сплава песка, мела и флюсов (шихта сырьевой смеси состоит из 70 % песка, 25 % мела и 5 % доломита). Плавление шихты осуществляется во вращающейся печи при температуре 1550...1600 °С. После плавления масса охлаждается до температуры 1200 °С. Охлаждение идет в заданном режиме для получения материала кристаллического строения. После полного охлаждения материал поступает в дробилку, где измельчается до зерен мельче 25 мм. Средняя плотность синопала составляет 1200 кг/м^3, водонасыщение по массе — до 0,5 %, предел прочности на сжатие — 250...300 МПа.

При строительстве асфальтобетонных покрытий с использованием синопалового щебня повышается светоотражающая способность дорожного покрытия, уменьшается расход электроэнергии на освещение улиц, повышаются сцепные качества асфальтобетонного покрытия.

6.4.4. Изделия из шлакового литья

Из огненно-жидких шлаков путем отливки получают штучные изделия для дорожных покрытий и тротуаров (мозаиковая шашка, брусчатка, плиты), для полов промышленных предприятий, облицовочные плитки, которые используются на предприятиях химической промышленности. Так же получают щебень, термозит, шлаковую вату и гранулированные шлаки, которые применяют при получении минеральных вяжущих материалов как активную минеральную добавку.

Щебень, получаемый из огненно-жидких шлаков, имеет хорошее сцепление с вяжущими материалами, в нем поч-

ти отсутствуют лещадные и игольчатые частицы. Он отличается высокой прочностью при сжатии (предел прочности до 100 МПа), высокой износо- и морозостойкостью. Вследствие этого может применяться наравне со щебнем из горных пород для приготовления асфальто- и цементобетонов, а также для устройства конструктивных слоев дорожных одежд без обработки вяжущими.

Термозит — ячеистый материал, получаемый путем вспучивания шлакового расплава и его дальнейшего быстрого охлаждения. Щебень из этого материала является хорошим заполнителем для легких бетонов, так как его плотность незначительна и колеблется в пределах 300...1100 кг/м^3 в зависимости от размера кусков и степени вспучивания.

Шлаковая вата представляет собой материал, состоящий из тончайших волокон длиной около 60 мм и толщиной до 12 мкм. Получают этот материал путем распыления тонкой струи шлакового расплава струей пара, в результате чего образуются тонкие нити. Иногда шлаковую вату получают распылением шлакового расплава быстро вращающимися дисками. Это высокоэффективный звукопоглощающий и теплоизоляционный материал. Он гнилостоек, морозоустойчив, имеет незначительную плотность (150...250 кг/м^3).

Гранулированный шлак — мелкозернистый материал (размер зерен 0,1...0,7 мм), получаемый при быстром охлаждении расплавленного шлака и имеющий стекловидную структуру. Используется в качестве активных добавок при производстве цементов.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Какие строительные материалы относятся к необжиговым?
2. Назовите виды силикатных бетонов.
3. Как получают силикатный кирпич?
4. Что представляет собой пеносиликат?
5. Как получают ячеистые силикатные изделия?
6. Что представляет собой строительный раствор?
7. Назовите виды строительных растворов и их назначение.
8. Какие строительные материалы относятся к обжиговым?
9. Дайте характеристику керамическому рядовому (обыкновенному) кирпичу.

10. Перечислите виды керамического обыкновенного кирпича (размеры, названия граней).

11. Опишите технологию производства обыкновенного керамического кирпича (пластичный, полусухой способ).

12. Что представляет собой эффективный кирпич и керамические камни?

13. Что представляет собой клинкерный (дорожный) кирпич?

14. Для чего используют керамзит? Опишите технологию его получения.

15. Что представляет собой аглопорит (назначение, получение)?

16. Что представляет собой клинкерный щебень (керамдор)?

17. Назовите параметры строительного стекла.

18. Назовите основные изделия из стекла.

19. Что представляют собой ситаллы (получение, применение)?

20. Расскажите о плавленых каменных материалах (каменном литье).

7 ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

7.1. Общие сведения и классификация органических вяжущих материалов

Органические вяжущие материалы — вещества органического происхождения. Они способны под влиянием физических или химических процессов переходить из пластичного состояния в малопластичное или твердое и обладают достаточной адгезией к минеральным, металлическим и другим материалам.

Эти вещества встречаются в природе в составе битуминозных горных пород (природные) или получаются искусственно путем относительно простой переработки сырья органического происхождения.

Природные органические материалы (асфальт, битум) были известны еще в глубокой древности: примерно в 3800 г. до н.э. в Ассирии для изготовления кирпича и строительства дорог использовали асфальт (горная пористая порода, пропитанная органическим веществом), который добывали в естественных месторождениях.

В дальнейшем (в 1-м тыс. н.э.) асфальт стали использовать как материал для гидроизоляции и уплотнения.

Сырьем для получения искусственных органических вяжущих (битум, дегти, эмульсии на их основе) являются нефть, каменный уголь, древесина, горючие сланцы, торф.

Наибольшее применение в строительстве получили дегтевые и битумные вяжущие материалы. Битумные и дегтевые вяжущие имеют темно-коричневый или черный цвет, поэтому их часто называют черными вяжущими.

Дегтевые вяжущие — искусственные материалы, получаемые в заводских условиях. При сухой перегонке (без доступа

воздуха) каменного или бурого угля, сланца, дерева, торфа и других органических веществ с целью получения кокса, полукокса, газа образуются вязкие жидкости, называемые соответственно каменноугольными, буроугольными, сланцевыми, древесными, торфяными дегтями.

Наиболее широкое применение в строительстве получили каменноугольные дегти, обладающие наиболее высокими строительными качествами.

Дегтевые материалы применяют ограниченно, так как большинство из них служат сырьем для получения разных химических продуктов. К тому же дегтевые вяжущие и материалы на их основе под влиянием влаги, кислорода воздуха, солнечной радиации сравнительно быстро стареют, становясь хрупкими и малопрочными, а также обладают неприятным запахом и выделяют вредные для здоровья вещества (фенолы и др.).

Битумные вяжущие вещества могут быть как природные, так и искусственные.

Природные битумы (твердые или вязкие) образовались из нефти в верхних слоях земной коры в результате испарения летучих фракций и под влиянием окислительного процесса и полимеризации. Природные битумы иногда встречаются в виде залежей, состоящих из битума с небольшим количеством минеральных примесей, но чаще они содержатся в осадочных горных породах — песках, песчаниках, карбонатных породах (известняках $CaCO_3$, доломитах $CaCO_3 \cdot MgCO_3$), глинистых грунтах. Такие породы называют *асфальтовыми* или *битуминозными*.

Природные битумы отличаются высокой атмосферостойкостью и хорошим прилипанием (адгезией) к поверхности каменных материалов, но из-за дефицитности и высокой стоимости в строительстве применяются ограниченно. Их используют главным образом в химической и лакокрасочной промышленности.

В настоящее время во всем мире получили наибольшее распространение нефтяные битумы, получаемые из нефти путем переработки остатков, образовавшихся при ее фракционной перегонке.

7.2. Дорожные вязкие битумы

Битумы — сложная смесь высокомолекулярных углеводородов и их неметаллических производных (соединений углерода с кислородом, серой, азотом). Элементарный химический состав всех битумов достаточно близок: в них 70...80 % углерода, до 15 % водорода, до 10 % кислорода, до 5 % серы, до 3 % азота.

Однако элементарный состав не дает представления о десятках химических соединений, содержащихся в битумах. Выделить индивидуальные углеродные соединения из битумов весьма сложно, поэтому из битумов специальными методами вычленяют группы углеводородов с более или менее сходными свойствами (так называемый *групповой состав*):

- масла — 45...60;
- смолы — 20...40;
- асфальтены (твердая часть) — 10...25;
- парафины — до 5;
- асфальтогеновые кислоты и их ангидриды — до 1 %.

7.2.1. Краткая характеристика элементов группового состава битумов

Рассмотрим основные элементы группового состава битумов.

Масла легко растворяются в бензине, придают битуму текучесть и снижают температуру размягчения, легко испаряются, увеличивая вязкость битума. Молекулярная масса (М) 300...800 кг/моль.

Смолы — более сложная структура, их молекулярная масса М = 600...2000 кг/моль. В них содержится основное количество сернистых, азотистых и кислородных соединений. Смолы обладают полярностью (это ПАВ), так как содержат заряженные функциональные группы: $COOH^-$, $SH_2^+OH^-$, NH_2^+.

Смолы хорошо прилипают к поверхности каменных материалов, образуя на них плотные водоустойчивые пленки; хорошо растворяются в этиловом спирте (C_2H_5OH), бензине, хлороформе ($CHCl_3$); придают битумам растяжимость и эластичность.

Асфальтены по химическому составу близки к смолам. Это твердые, неплавкие вещества, от их содержания зависит вязкость и температура размягчения битумов. Молекулярная масса М = 1000...6000 кг/моль.

Карбены по химическому составу похожи на асфальтены. Растворяются только в сероводороде (H_2S).

Карбоиды — твердые вещества типа сажи, нерастворимые в органических растворителях.

Асфальтогеновые кислоты хорошо растворяются в спирте (C_2H_5OH) и хлороформе ($CHCl_3$). Они очень полярны и, следовательно, наиболее поверхностно-активны; в основном определяют адгезию битумов к поверхности каменных материалов.

Парафины — нейтральная вязкоподобная масса с М = = 300...500 кг/моль и температурой плавления 50...70 °С. При содержании более 3,5 % увеличивают хрупкость битума.

Групповой состав битума не является стабильным. Под влиянием температуры, кислорода воздуха, воды он может существенно изменяться вследствие частичного превращения одних групп углеводородов в другие по схеме масла → смолы → асфальтены. Это происходит:

- при нагреве битума на АБЗ (длительное содержание в рабочих емкостях);
- контактах с горячим минеральным заполнителем (≈200 °С) во время приготовления асфальтобетонной смеси (в смесителе).

Аналогичные изменения группового состава битума наблюдаются при его нахождении в слое дорожного асфальтобетонного покрытия. Эти изменения ускоряются транспортными нагрузками и фазовыми превращениями как самого битума, так и воды, находящейся в порах асфальтобетона.

Отмечается, что переход смол в асфальтены происходит быстрее, чем масел в смолы. Таким образом, в процессе окисления в битумах происходит более интенсивное накопление асфальтенов, что и определяет скорость старения битумов.

В поставляемых партиях битума групповой состав указывается как факультативное требование.

7.2.2. Дисперсные структуры битумов

Основным элементом, определяющим размеры и состав молекул битума, является четырехвалентный углерод. Атомы углерода способны образовывать соединения:

- цепочные;
- циклические;
- цепочно-циклические.

Основная часть молекул битума состоит из скелета, состоящего из 25...150 атомов углерода.

В зависимости от содержания и свойств компонентов группового состава могут образовываться различные дисперсные структуры битума: гель, золь и золь-гель.

Гель образуется при повышенном содержании в битуме асфальтенов и масел и малом содержании смол*: асфальтенов (А) > 25 %; масел (М) > 50 %; смол (С) до 19 %.

В битумах со структурой гель соотношение

$$\frac{A}{C+M} > 0{,}35.$$

Согласно принятой классификации, дорожные битумы с таким групповым составом относят к *I структурному типу*. Это строительные марки битумов.

Золь характеризуется пониженным содержанием асфальтенов (менее 18 %), повышенным содержанием смол (более 36 %) и меньшим содержанием масел (до 47 %). В битумах с такой структурой $\frac{A}{C+M} \leq 0{,}22$.

Битумы с таким групповым составом относятся ко *II структурному типу*.

К этой группе относят жидкие битумы при нормальной температуре или вязкие, разогретые до перехода в жидкое состояние.

Структура золь-гель характерна для вязких битумов при нормальной температуре, у которых одновременно проявляются вязкие и пластические свойства. Такие битумы рекомен-

* Для характеристики всех структур битумов приводятся примерные цифры.

дуются для получения дорожных асфальтобетонов (*III структурный тип*).

Битумы III типа имеют промежуточный состав и содержат: асфальтенов — 21...23 %; смолы — 30...34 %; масла — 45...49 %.

Соотношение асфальтенов и мальтеновой части находится в пределах:

$$0{,}25 < \frac{A}{C + M} < 0{,}30.$$

Установлено, что битумы III типа наиболее приемлемы для дорожного строительства. Оптимизация группового состава битумов для дорожной отрасли должна осуществляться по нормативным документам, составленным специалистами дорожного материаловедения.

Разделение битумов по структуре на указанные типы является достаточно условным, так как не только соотношение основных групп углеводородов в битуме, но и их индивидуальный состав и свойства, степень развитости боковых цепей, наличие функциональных групп и др. будут оказывать существенное влияние на физико-химические свойства битумов.

Тем не менее, такая классификация дает возможность связать воедино состав, структуру и основные свойства битумов.

В целом соотношение между основными группами (М, С, А), входящими в состав битума, определяет его важнейшие физико-механические свойства:

- вязкость;
- восприимчивость к изменению температуры (старение);
- хрупкость;
- эластичность.

7.2.3. Основные физико-механические свойства вязких битумов

В дорожной отрасли потребляется 90 % вязких битумов. Они используются для производства асфальтобетонов (для строительства всех видов усовершенствованных дорожных покрытий и оснований) и гидроизоляции транспортных сооружений.

При изготовлении смесей битума с каменным материалом к этому вяжущему предъявляются два основных требования: оно должно хорошо смачивать каменный материал, образовывая на нем оптимальную толщину пленки, и прочно прилипать к поверхности минеральных частиц.

При соблюдении этих требований частицы каменного материала будут равномерно покрыты битумной пленкой, а смесь получится однородной и способной при ее уплотнении образовать прочный монолит. Поэтому вязкость битума при образовании смеси и при ее уплотнении должна быть в требуемых пределах. Если вязкость битума больше допустимой, такую смесь трудно уплотнять, если же меньше допустимой, смесь не может уплотняться из-за своей пластичности.

Исходя из особенностей погодно-климатических условий и механических транспортных нагрузок для надежной работы дорожной одежды битум должен соответствовать определенным требованиям.

1. *Летний период*. Пленка структурированного битума должна быть малодеформативной, а вязкость объемного битума (в межзерновых пустотах) должна быть достаточно высокой. В противном случае в слое покрытия и основания могут появляться пластические деформации в виде волн и колей.

2. В *осенний* и *весенний периоды* главным разрушающим фактором является вода. Поэтому пленка битума на минеральных частицах должна быть водостойкой, прочной и не отслаиваться водой. Поскольку в эти периоды несущая способность переувлажненных грунтов под дорожной одеждой снижается, появляются сдвиговые деформации, стремящиеся сместить битумные пленки с поверхности минеральных частиц. При нарушении указанных условий (снижения адгезионной способности битума) в дорожной одежде могут возникнуть микротрещины и она начнет постепенно разрушаться при воздействии транспортных нагрузок.

3. *Зимой* структурированный и объемный битумы покрытий должны обладать достаточной деформативностью (вязкостью), что особенно важно при резком перепаде отрицательных температур (включая циклы перехода через нулевую температуру при оттепелях).

4. **Битум должен быть устойчивым к старению, поскольку** энергия факторов внешней среды приводит к хрупкости, связанной с потерей им со временем вязко-пластических свойств.

Старение дорожных битумов зависит от различных факторов:

- температуры и продолжительности нагрева при их подготовке к использованию;
- температуры, при которой происходит перемешивание битума с каменными материалами (когда битум находится в пленочном состоянии);
- свойств каменных материалов и др.

Под воздействием комплекса этих факторов изменяются основные физико-механические свойства битумов: повышается вязкость, снижается пластичность и увеличивается хрупкость.

Старение битумов происходит по различным причинам, основными из которых являются:

- испарение легколетучих углеводородов, содержащихся в масле, при повышении температуры;
- химическое изменение компонентов битумов, а следовательно, и его группового состава под действием кислорода воздуха, ультрафиолетовых лучей и др.;
- изменение характера взаимодействия его составляющих с минеральными материалами в битумоминеральной смеси (обычно пористые минеральные материалы поглощают некоторые составные части битума, чаще всего масла, в результате чего происходит нарушение структуры и старение битума).

В результате воздействия на битум комплекса вышеназванных факторов составные части битумов изменяются: масла переходят в смолы, а смолы в асфальтены и т.д. Процесс превращения смол в асфальтены идет значительно интенсивнее, чем масел в смолы. Накопление асфальтенов приводит к потере битумом пластических свойств и увеличению его хрупкости.

Одни и те же битумы стареют с различной интенсивностью в зависимости от условий, в которых они находятся. При длительном нагреве, особенно при высоких технологических

температурах, процесс изменения группового состава битума протекает более интенсивно. К тому же битумы, подвергавшиеся длительному нагреву при высоких температурах, оказываются, как правило, более склонными к старению. Воздействие температуры 160 °С и выше в течение 5 ч и более в значительной степени увеличивает вязкость и уменьшает интервал пластичности битумов.

На стабильность битума в асфальтобетонах большое влияние оказывают качество заполнителя, его пористость, минералогический состав, характер поверхности (шероховатость). При заполнителях из высокопрочных и плотных каменных материалов с шероховатой поверхностью зерен битумы меньше подвержены старению, чем в асфальтобетонах с пористыми заполнителями. Способствуют старению битумов минеральные материалы, содержащие оксиды железа и алюминия (Fe_2O_3 и Al_2O_3).

Для торможения старения битумов используют специальные добавки — ***антистарители*** (***ингибиторы***): соли олеиновой, нафтеновой, стеариновой и других жирных кислот; их массовая доля в битуме составляет 0,05...0,5 %. Замедляют старение регенераты бутилкаучуковых отходов шинной промышленности, которые, помимо стабилизации свойств, способствуют повышению теплоустойчивости битумов и расширяют интервал их пластичности. Массовая доля таких веществ в битумах — 6...10 %. Уменьшают интенсивность старения кумароновая смола (при массовой доле до 10 %), полиэфирные ненасыщенные смолы (3...5 %), а также сера, сульфопиридин, ализарин, гидрохинон, фентиазин (до 0,2 % от массы вяжущего).

Замедление старения битума в покрытии может быть достигнуто также применением плотных асфальтобетонов, в которых отсутствует циркуляция воздуха и воды, что замедляет процесс окисления битума, находящегося в тонких слоях. Однако в настоящее время нет общепринятых методов повышения стабильности битумов ввиду непостоянства их состава и свойств. Поэтому как методы, так и вещества, замедляющие старение битумов, подбираются в каждом конкретном случае.

В дорожном покрытии битум стареет быстрее, чем в основании, так как слой основания защищен слоем покрытия от непосредственного воздействия солнечной радиации и кислорода воздуха.

Для определения ряда свойств битума, отражающих реальные условия его работы в дорожном покрытии (прочности, деформативности и др.), нужна сложная аппаратура, недоступная для лабораторий на производстве. Поэтому в настоящее время в строительных лабораториях проводят не прямые определения параметров этих свойств, а условные испытания, показатели которых позволяют косвенно судить о свойствах битума.

Для характеристики *вязкости* дорожных битумов пользуются условным показателем — ***глубиной проникания стандартной иглы*** (***пенетрацией***) в битум при определенной температуре. Глубину проникания иглы определяют на специальном приборе — пенетрометре. Чем меньше глубина проникания, тем больше вязкость битума и его прочность.

В зависимости от глубины проникания иглы при 25 °С вязкие дорожные битумы для верхнего слоя покрытия изготавливаются следующих марок: БД 200/300, БД 130/200, БД 90/130, БД 60/90 и БД 40/60.

О *прочности битумной пленки* при повышенных летних температурах можно судить по ***температуре размягчения битума***, которую определяют с помощью прибора «кольцо и шар». Чем выше температура размягчения, тем больше его температурная устойчивость в летнее время.

Деформативность пленки битума при пониженных отрицательных температурах связана с ***температурой хрупкости битума*** ($T_{хр}$), которую определяют на приборе Фрааса. Чем ниже температура хрупкости битума, тем более деформативен он в зимнее время. Температура хрупкости для вязких битумов колеблется в пределах −30...−5 °С. О деформативности битума при 0 °С можно также судить по величине пенетрации при этой температуре: чем она больше, тем больше деформативность пленки битума при температурах, близких к 0 °С.

При изменении температуры битумы значительно изменяют свои свойства, главным образом вязкость. При повышенных температурах битумы переходят в жидкое состояние, что резко снижает прочность и связность тех материалов, в которых они используются (асфальтобетоны, мастики и др.). При отрицательных температурах битум и материалы на его основе становятся хрупкими. Переход битумов из жидкого в вязкопластичное, а затем в твердое (хрупкое) состояние и обратно протекает в определенном интервале температур (50...100 °С) — ***интервале превращения***. Интенсивность изменения вязкопластичных свойств характеризует теплоустойчивость битумов, ее определяют интервалом пластичности.

Интервал пластичности ($T_п$) представляет собой алгебраическую разность между температурами размягчения ($T_р$) и хрупкости ($T_{хр}$):

$$T_п = T_р - T_{хр}. \qquad (7.1)$$

Чем ниже температура хрупкости и выше температура размягчения, тем больше интервал превращения, в котором битум находится в вязкопластичном состоянии и тем лучше его строительно-эксплуатационные свойства.

Пластичность битумов характеризуется ***растяжимостью*** ($Р_{25}$), которая определяется на дуктилометре путем растяжения стандартных образцов-восьмерок при температуре +25 °С. Длина битумной нити в момент ее разрыва, выраженная в сантиметрах, является показателем растяжимости.

В зависимости от группового состава и структуры вязкие битумы при одинаковой вязкости могут иметь различные когезию, адгезию и теплоустойчивость.

Чтобы учитывать сравнительную теплоустойчивость битумов, В.А. Золотарев предложил разделить битумы с пенетрацией 40...130 на структурно-реологические типы с помощью коэффициента $К_{стр}$:

$$К_{стр} = \frac{\left(T_р - T_{хр}\right)}{Р_{25}}, \qquad (7.2)$$

где P_{25} — растяжимость битума при 25 °С, см.

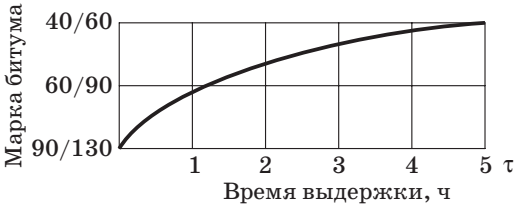


Рис. 7.1. Изменение марки битума в зависимости от времени его выдержки при высокой температуре

При $К_{стр} \geq 1,1$ битумы имеют высокую теплоустойчивость, при $К_{стр} = 0,.65...1,1$ — удовлетворительную, при $К_{стр} < 0,65$ — малую.

При выдерживании битума в тонких пленках при высокой температуре процессы старения протекают настолько интенсивно, что практически в течение нескольких часов битум переходит в другую марку с более высокой вязкостью (рис. 7.1). В итоге асфальтобетон в покрытии содержит битум с меньшей глубиной проникания иглы (пенетрацией), чем было принято при подборе его состава. Таким образом, уже на технологической стадии тепловой подготовки битума можно значительно ухудшить его теплоустойчивость, что является одной из главных причин существенного сокращения срока службы асфальтобетонных покрытий.

Поэтому при выборе марки битума для асфальтобетона необходимо учитывать не только дорожно-климатическую зону эксплуатации покрытия (расчетную температуру покрытия в летнее время и продолжительность ее стояния в строительный сезон), но и изменение свойств битума в технологическом процессе его тепловой подготовки на битумных базах и асфальтобетонных заводах. В зависимости от продолжительности выдерживания битума в рабочих емкостях (до его поступления в смеситель) марочную (исходную) вязкость битума желательно уменьшать путем применения менее вязких битумов заводского изготовления, т.е. вносить коррективы в проектируемый состав асфальтобетона до его изготовления на АБЗ.

Устойчивость битума при нагревании оценивается методом определения изменения массы после прогрева и изменения

свойств (пенетрации, растяжимости и др.). Пробы нагревают до температуры 160 °С в течение 5 ч. Изменения свойств при нагреве объясняются испарением части легких масел, а также процессами окисления и полимеризации, протекающими при нагревании более интенсивно. По этим изменениям можно судить о стабильности свойств вяжущих во времени.

Интенсивность изменения упруговязкопластичных свойств битума характеризует его *теплоустойчивость*. Косвенно о теплоустойчивости судят по температуре размягчения и индексу пенетрации.

Для характеристики изменения вязкости битумов принято определять ***индекс пенетрации***, отражающий интервал пластичности или характер изменения вязкости в виде отвлеченного числа:

$$\text{ИП} = \frac{30}{1 + 50A} - 10, \tag{7.3}$$

$$A = \frac{2{,}9031 - \lg \text{П}_{25}}{T_\text{р} - 25}, \tag{7.4}$$

где $T_\text{р}$ — температура размягчения, °С; П_{25} — пенетрация битума при +25 °С

Чем выше индекс пенетрации, тем больше теплоустойчивость и шире интервал пластичности битумов. Так, битумы с ИП < −2 характеризуются повышенной чувствительностью к изменению температуры. При низких температурах и кратковременных нагрузках от колес автомобильного транспорта они разрушаются, как хрупкий материал. При ИП = −2...+2 битумы менее чувствительны к изменению температуры, менее хрупки, так как сохраняют вязкоупругие свойства при низких температурах. Эти битумы наиболее широко применяются в дорожном строительстве. Битумы с ИП > 2 характеризуются высокой теплоустойчивостью и малой хрупкостью при низких температурах.

Для уменьшения хрупкости и увеличения интервала пластичности в битумы вводят специальные добавки (латексы, каучук и др.).

Температура вспышки — это температура, при которой пары, образующиеся при подогреве вяжущего в откры-

том тигле, воспламеняются от поднесенного к ним пламени. Температура, при которой это пламя горит не менее 5 с, называется ***температурой воспламенения***. Температура вспышки вязких битумов не ниже 220 °С. Этот показатель важен для разработки противопожарных мероприятий.

Объемное тепловое расширение битумов характеризуется ***коэффициентом объемного расширения*** при температуре 25 °С. Он находится в пределах от $5 \cdot 10^{-4}$ до $8 \cdot 10^{-4}$; при пониженных температурах — $2 \cdot 10^{-4}$. Более высокие значения коэффициента соответствуют более вязким битумам.

Теплоемкость — количество тепла в килоджоулях, необходимое для нагрева 1 кг битума на 1 °С. Теплоемкость битумов равна 1,8...1,97 кДж/(кг · К).

Теплопроводность битума характеризуется коэффициентом теплопроводности. Она равна количеству тепла, которое может пропустить образец материала площадью 1 $м^2$ при толщине 1 м и перепаде температур в 1 К в течение 1 с. Теплопроводность битумов равна 0,15...0,175 Вт/(м · К).

Смачиваемость битумом минеральных материалов зависит от содержания в нем поверхностно-активных полярных соединений и свойств каменных материалов. Количественной мерой процесса смачивания может служить угол, образованный каплей и твердой поверхностью. Этот угол называется ***краевым углом смачивания*** и обозначается θ. Значения θ могут меняться в пределах от 0 до 180°. Величину угла смачивания отсчитывают между твердой поверхностью и касательной, проведенной к поверхности капли в точке соприкосновения твердой, жидкой и газообразной фаз. Измерение угла производят со стороны жидкости (рис. 7.2).

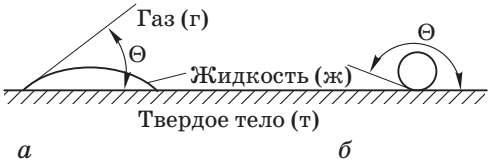


Рис. 7.2. Краевые углы смачивания:
а — смачивающая жидкость; *б* — несмачивающая жидкость

В основе процессов смачивания и растекания лежат поверхностное натяжение и межмолекулярные взаимодействия внутри фаз, а также явления когезии и адгезии. Малая капля жидкости, помещенная на твердую поверхность, может принять форму, либо близкую к сферической (капля воды на поверхности парафина), либо плоскую (капля воды на поверхности чистого стекла). В первом случае твердая поверхность не смачивается жидкостью, во втором — смачивается. Явление смачивания определяет ход многих процессов в строительном материаловедении, так как служит начальной стадией взаимодействия жидкостей с твердыми телами.

Поверхностное натяжение — это работа, затрачиваемая каплей жидкости, стремящейся уменьшить свою поверхность при контакте с твердой поверхностью. Поверхностное натяжение битумов при температуре 20...25 °С равно $25 \cdot 10^{-3}...35 \cdot 10^{-3}$ Дж/см^2.

Если краевой угол острый, то смачивание хорошее, поскольку притяжение молекул жидкости поверхностью минерального материала (адгезия) приближается к внутреннему притяжению молекул жидкости (когезия). Если краевой угол большой (тупой), смачивание плохое, притяжение молекул жидкости минеральным материалом слабое. Таким образом, минеральный материал тем лучше смачивается жидкостью, чем меньше силы сцепления между ее молекулами (когезия) и чем больше силы притяжения между молекулами жидкости и минерального материала (адгезия).

Сцепление органических вяжущих с каменными материалами (адгезия) зависит от физико-химических свойств вяжущих, содержания в них активных функциональных групп, полярности, поверхностного натяжения. Для определения прилипания битума к каменным материалам существует ряд методов, основанных на способности каменных материалов, предварительно обработанных битумом, удерживать битумную пленку при ее вытеснении во время кипячения в воде.

Для вязких битумов определяют сцепление с мрамором и песком двумя методами: метод А — пассивное сцепление и ме-

тод Б — активное. Метод А заключается в определении способности вязкого битума удерживаться на предварительно покрытой им поверхности песка или мрамора при воздействии воды, метод Б — в определении способности жидкого или вязкого битума сцепляться с поверхностью песка или мрамора в присутствии воды.

Сцепление битума оценивают степенью смещения битумной пленки с поверхности минерального материала путем сравнения с фотографиями контрольных образцов. Для более точного определения площади обнаженных от битума минеральных зерен применяются методы адсорбции красителей, меченых атомов или люминесценции. При недостаточной поверхностной активности битума и плохом прилипании его к каменным материалам применяют поверхностно-активные добавки в битум или активируют поверхность минеральных материалов известью, цементом, хлорным железом, что способствует улучшению прилипания битума.

В настоящее время в дорожной отрасли используют два нормативных документа, регулирующих применение битумов: ГОСТ 22245–90 «Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия» и СТБ 1062–97 «Битумы нефтяные для верхнего слоя дорожного покрытия. Технические условия».

ГОСТ 22245–90 распространяется на вязкие дорожные битумы, используемые в качестве вяжущего материала при строительстве и ремонте дорожных и аэродромных покрытий.

В зависимости от глубины проникания иглы при 25 °С вязкие дорожные нефтяные битумы изготовляют следующих марок: БНД 200/300; БНД 120/200; БНД 90/130; БНД 60/90; БНД 40/60; БН 200/300; БН 120/200; БН 90/130; БН 60/90.

По физико-механическим показателям битумы БНД и БН должны соответствовать требованиям, указанным в табл. 7.1

Рекомендуемая область применения битумов БНД и БН в дорожном строительстве указана в табл. 7.2.

Таблица 7.1

Физико-механические показатели свойств битумов БНД и БН

Показатель	Норма для битума марки									Метод испытания
	БНД 200/300	БНД 130/200	БНД 90/130	БНД 60/90	БНД 40/60	БН 200/300	БН 130/200	БН 90/130	БН 60/90	
Глубина проникания иглы, 0,1 мм, не менее:										По ГОСТ 11501–78
при 25 °С	201...300	131...200	91...130	61...90	40...60	201...300	131...200	91...130	60...90	
при 0 °С	45	35	28	20	13	24	18	15	10	
Температура размягчения по кольцу и шару, °С, не ниже	35	40	43	47	51	33	38	41	45	По ГОСТ 11506–73
Растяжимость, см, не менее:										По ГОСТ 11505–75
при 25 °С	—	70	65	55	45	—	80	80	70	
при 0 °С	20	6,0	4,0	3,5	—	—	—	—	—	
Температура хрупкости, °С (по Фраасу), не выше	–20	–18	–17	–15	–12	–14	–12	–10	–6	По ГОСТ 11507–78 с дополнением по п. 3.2
Температура вспышки, °С, не ниже	220	220	230	230	230	220	230	240	240	По ГОСТ 4333–87
Изменение температуры размягчения после прогрева, °С, не более	7	6	5	5	5	8	7	6	6	По ГОСТ 11506–73 с дополнением по п. 3.3
Индекс пенетрации	–1,0...+1,0					–1,5...+1,0				По прил. 2 ГОСТ 22245–90

Таблица 7.2

Область применения вязких битумов в дорожном строительстве

Дорожно-климатическая зона	Среднемесячные температуры наиболее холодного времени года, °С	Марка битума
I	Не выше −20	БНД 90/130, БНД 130/200, БНД 200/300
II, III	−10...−20	БНД 60/90, БНД 90/130, БНД 130/200, БНД 200/300
II, III, IV	−5...−10	БНД 40/60, БНД 60/90, БНД 90/130, БНД 130/200, БН 90/130, БН 130/200, БН 200/300
IV, V	Не ниже +5	БНД 40/60, БНД 60/90, БНД 90/130, БН 60/90, БН 90/130

СТБ 1062–97 распространяется на нефтяные битумы, предназначенные для применения в качестве вяжущего материала при строительстве и ремонте верхних слоев дорожных и аэродромных покрытий.

Условное обозначение битумов при заказе должно состоять из наименования битума, марки и обозначения стандарта (например, БД 90/130 СТБ 1062–97).

По физико-химическим показателям такие битумы должны соответствовать требованиям и нормам, указанным в табл. 7.3.

Групповой химический состав битумов факультативно нормируется следующими значениями:

- масла — 45...49 %;
- смолы — 32...34 %;
- асфальтены — 19...21 %.

Таблица 7.3

Физико-химические показатели свойств битумов для верхнего слоя дорожного покрытия

Показатель	Норма для битума марки					Метод испытания
	БД 200/300	БД 130/200	БД 90/130	БД 60/90	БД 40/60	
Глубина проникания иглы, 0,1 мм, не менее:						По ГОСТ 11501–78
при 25 °С	201...300	131...200	91...130	61...90	40...60	
при 0 °С	45	35	28	20	13	
Температура размягчения по кольцу и шару, °С, не ниже	35	40	43	47	51	По ГОСТ 11506–73
Растяжимость, см, не менее:						
при 25 °С	–	70	65	55	45	По ГОСТ 11505–75
при 0 °С	10	6,0	4,0	3,5	—	
Температура хрупкости, °С, не выше	–20	–18	–17	–15	–12	По ГОСТ 11507–78
Температура вспышки, °С, не ниже	220	230	235	240	240	По ГОСТ 12.1.044–84
Содержание парафина, % по массе, не более	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	По ГОСТ 28967–91
Коэффициент сцепления битума с гранитным щебнем при 20°С, не менее	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	В соответствии с прил. А СТБ 1062–97
Показатели физико-химических свойств после прогрева (+163 °С/300 мин):						
а) потеря в массе, %, не более	1,0	1,0	0,5	0,5	0,2	По ГОСТ 18180–72
б) изменение глубины проникания иглы при 25 °С, %, не более	50	40	40	40	40	По ГОСТ 11501–78 с дополнен. по п. 8.4
в) изменение температуры размягчения по кольцу и шару, °С, не более	7	6	5	5	5	По ГОСТ 11506–73

7.3. Технология получения вязких и жидких дорожных битумов и методы их улучшения

Сырьем для производства вязких дорожных нефтяных битумов является ***нефть*** — жидкое горючее ископаемое, представляющее собой смесь углеводородов и их соединений с кислородом, серой, азотом.

Используемые для производства дорожных битумов нефти классифицируют по двум признакам:

- содержанию смол: высокосмолистые (более 20 %), смолистые (8...20 %), малосмолистые (менее 8 %);
- содержанию парафинов: высокопарафинистые (более 6 %), малопарафинистые (менее 6 %).

Лучшими являются высокосмолистые малопарафинистые нефти с небольшим содержанием серы.

Нефть перерабатывают на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) с целью получения горючесмазочных материалов: бензина, керосина, лигроина, дизельного топлива, моторных масел и других веществ. Для этого нефть подвергают *фракционной разгонке* в установках атмосферной или атмосферно-вакуумной перегонки. Широкое применение находит крекингование (крекинг-процесс) тяжелых остатков после разгонки нефти. В результате обработки отходов перегонки нефти получают нефтяные битумы.

7.3.1. Производство вязких дорожных битумов

Технологические процессы производства вязких дорожных битумов основаны на воздействии на остаточные после перегонки нефти *гудроны* повышенной температуры воздуха, пара, различных окисляющих добавок.

После получения бензина, керосина, лигроина, дизтоплива, масел в виде остатка образуется *мазут* (перегоняется при температуре 330...350 °С). Для того чтобы выделить из него высококипящие фракции (масла), мазут подвергают перегонке при температуре более 500 °С и обрабатывают в установке

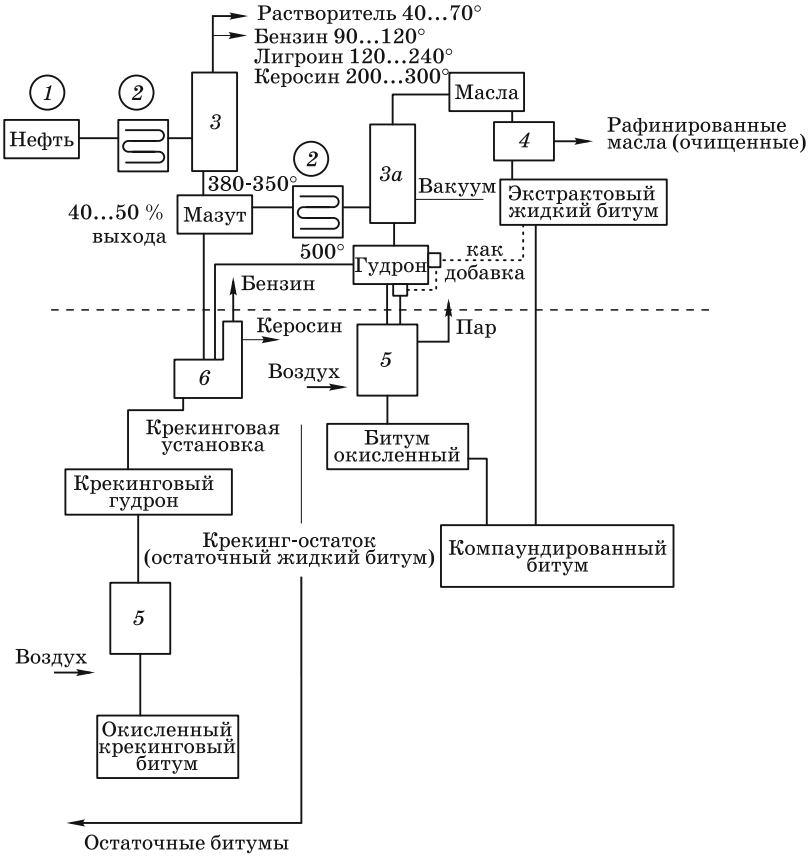


Рис. 7.3. Принципиальная схема производства битумов: *1* — хранилище нефти; *2* — трубчатая печь; *3* — ректификационная колонна; *3а* — атмосферно-вакуумная установка; *4* — установка очистки масел; *5* — окислительная установка; *6* — крекинговая установка

с применением вакуума (рис. 7.3). В результате образуется остаточный продукт — гудрон, после обработки которого в крекинговой установке образуются бензин, керосин и крекинг-остаток. Последний используют как остаточный жидкий дорожный битум марок МГ 40/70, МГ 70/130, а также в качестве сырья для получения вязких дорожных остаточных крекинг-битумов.

Крекингование — химическое расщепление молекул тяжелой части нефти (мазута, гудрона), в результате которого повышается выход более легких (бензино-керосиновых) углеводородов. В остатке получают смолистые вещества. Крекинг-процесс был предложен в 1882 г. Д.И. Менделеевым, а в 1891 г. запатентован В.Г. Шуховым. Крекинг-процесс происходит при нагревании нефтепродуктов до 425...650 °С и давлении до 5 МПа.

В зависимости от вида нефти и технологического режима ее переработки получают следующие виды битумов: остаточные, окисленные и компаундированные.

Для производства остаточного вязкого битума желательно использовать высокосмолистые малопарафинистые нефти.

Производство остаточных битумов. Производство остаточных битумов основано на концентрации асфальтенов и смол, содержащихся в гудроне, путем отгона из него части углеводородов. Гудрон перегоняют в установке глубокого вакуума в присутствии перегретого водяного пара. Перегретый водяной пар, повышенный вакуум и температура нагрева (420...430 °С) позволяют полнее выделить из гудрона масляные фракции и получить вязкие остаточные битумы.

Технологическая схема получения остаточного вязкого битума показана на рис. 7.4. Нефть нагревают в печи *1*, затем она поступает в ректификационную колонну *2*. Мазут из этой колонны нагревают, и он идет в вакуумную колонну *3*.

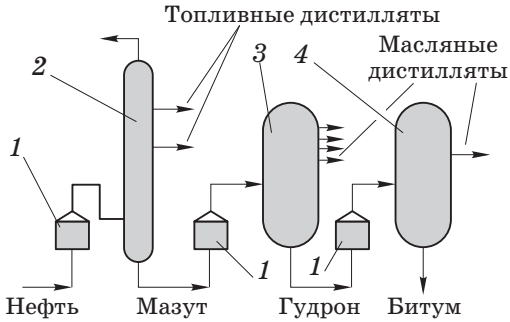


Рис. 7.4. Технологическая схема получения вязкого остаточного битума:
1 — нагревательная печь; *2* — ректификационная колонна; *3* — вакуумная колонна; *4* — установка глубокого вакуума

Полученный гудрон поступает в колонну глубокого вакуума *4*, где из него отгоняют масляные фракции, а в остатке получают битум. В ряде случаев маловязкие остаточные битумы могут быть получены сразу после перегона нефти на атмосферно-вакуумных трубчатых установках.

Производство окисленных битумов. Производство окисленных битумов основано на окислении сырья кислородом воздуха в реакторах битумных установок. В качестве сырья используют в основном гудроны. В ряде случаев в них добавляют некоторые остатки от переработки нефти и нефтепродуктов.

В настоящее время на нефтеперерабатывающих заводах вязкие дорожные битумы производят на битумных установках с реактором колонного типа или со змеевиковым реактором (рис. 7.5). Сырье через теплообменник и нагревательную печь *1* подают в реактор *2*. Высота реактора колонного типа может быть в пределах 4...25 м, диаметр — 0,8...3 м. От размеров реактора зависит производительность установки. Воздух поступает в реактор через маточник, расположенный внизу. Форма реактора позволяет полнее использовать кислород воздуха, вступающий в реакцию с компонентами сырья. Готовый битум поступает в емкость для хранения и розлива битума.

Отработанный газ из верхней части реактора идет в конденсатор-холодильник, где его охлаждают водой. Сконденсировавшиеся продукты используют в качестве топлива, а несконденсировавшиеся — сжигают. Температура окисления

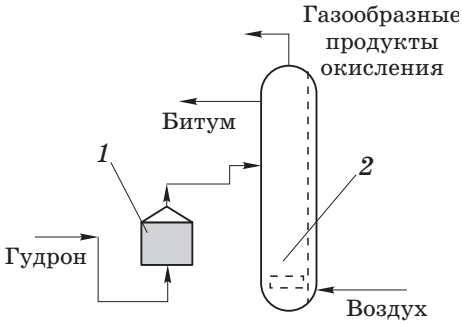


Рис. 7.5. Технологическая схема битумной установки с реактором колонного типа для получения окисленного битума:
1 — нагревательная печь; *2* — реактор

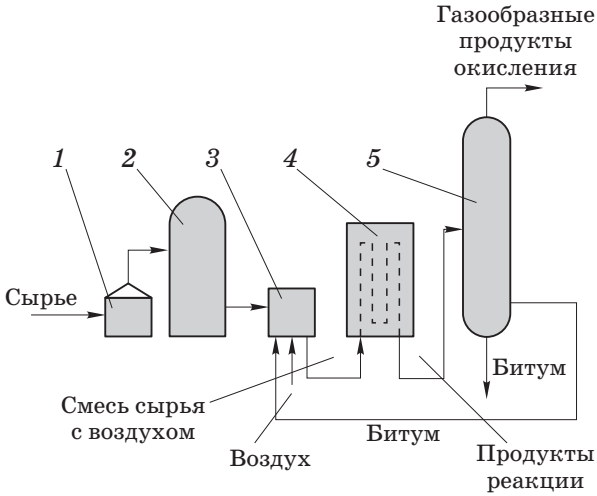


Рис. 7.6. Технологическая схема битумной установки с реактором змеевикового типа:
1 — нагревательная печь; *2* — емкость для горячего сырья; *3* — смеситель; *4* — реактор; *5* — испаритель

зависит от вида сырья и находится в пределах 200...260 °С. Расход воздуха составляет около 300 м^3 на 1 т сырья.

Технологическая схема битумной установки с реактором змеевикового типа показана на рис. 7.6. Исходное сырье поступает в нагревательную печь *1*, где его нагревают до 260 °С. Отсюда сырье подают в емкость для горячего сырья *2*, а затем в смеситель *3*. Сюда же поступает часть окисленного битума и сжатый воздух. Дальше смесь идет в реактор *4*. Окисление начинается в смесителе и продолжается в реакторе. Реакция окисления сырья кислородом воздуха протекает в трубах змеевика реактора в пенной фазе. Температура окисляемого сырья около 280 °С. Продукты реакции из реактора поступают в испаритель *5*, где происходит разделение жидкости и газообразной фазы. Отработанные газы поступают в воздушный холодильник, а потом в сепаратор. Сконденсировавшаяся часть нефтепродуктов из сепаратора поступает в емкости для топлива, а несконденсировавшиеся газы сжигают. В испарителе накапливается окисленный битум. Часть этого битума поступает

в холодильник, а оттуда — в емкости для хранения и розлива битума. В холодильнике битум охлаждается до 170 °С.

Из приведенных двух типов установок наиболее эффективной является установка с реактором колонного типа.

Для производства битумов используют битумные установки разной производительности. Малотоннажные установки, устанавливаемые, как правило, на территории асфальтобетонных заводов, имеют производительность до 15 тыс. т битума в год. Обычно это установки с реактором колонного или бескомпрессорного типа.

Технологическая схема производства окисленного вязкого дорожного битума в установке с реактором бескомпрессорного типа приведена на рис. 7.7. Сырье из хранилища *2* поступает в подготовительные котлы *3*, где его обезвоживают, а затем за-

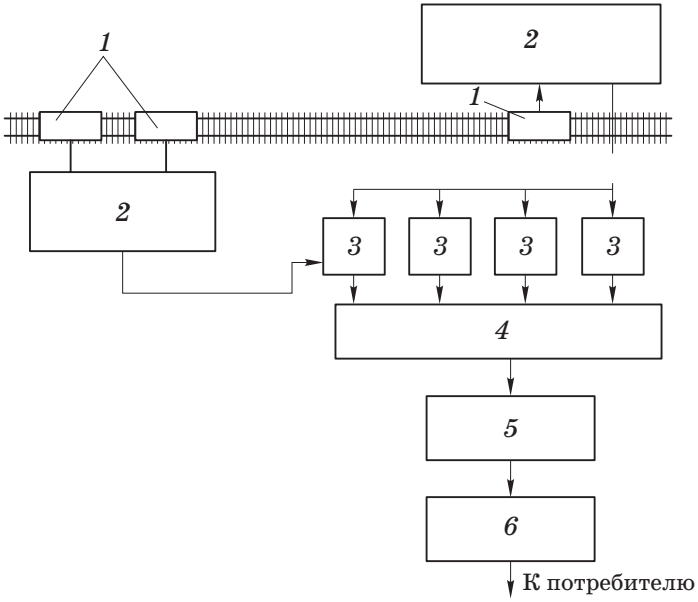


Рис. 7.7. Технологическая схема битумной установки с реактором бескомпрессорного типа:
1 — железнодорожные цистерны с нефтью; *2* — хранилище нефти; *3* — подготовительные котлы; *4* — реакторы; *5* — приемные емкости; *6* — раздаточная емкость

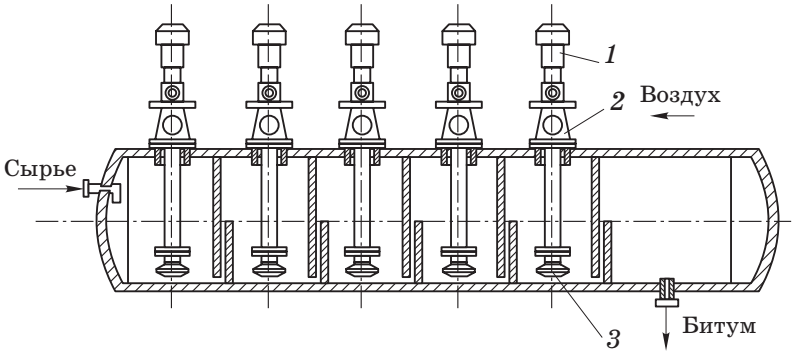


Рис. 7.8. Схема реактора бескомпрессорного типа:
1 — электродвигатель; *2* — вариатор; *3* — диспергатор

качивают в реактор *4* (рис. 7.8). Реактор заполняют сырьем на 2/3 объема. Диспергаторы всасывают воздух и распыляют его в сырье.

При получении окисленных битумов имеет место химическая переработка сырья. При окислении тяжелых остатков нефти идут следующие превращения: масла переходят в смолы, а смолы — в асфальтены. Наиболее интенсивное окисление компонентов нефти наблюдается в начальный период процесса, в дальнейшем он замедляется. При окислении кислород воздуха отщепляет атомы водорода с образованием углекислого газа и воды, которые впоследствии удаляются.

Исследования свойств битумов, полученных из гудронов, богатых масляными фракциями, показали, что такие битумы имеют пониженную температуру хрупкости, большую температуру размягчения при меньшей вязкости и высокие вязкопластические свойства при низких температурах. Битумы, полученные глубоким окислением, отличаются повышенным содержанием асфальтенов, что делает их более теплоустойчивыми, но менее пластичными.

Производство компаундированных битумов. Изготовление компаундированных битумов на нефтеперерабатывающих заводах основано на глубоком окислении асфальтов деасфальтизации и последующей пластификации их экстрактами селективной очистки масел. Технология изготовления компа-

ундированных битумов заключается в том, что асфальт деасфальтизации или его смесь с гудроном окисляют в битумной установке до температуры размягчения 70...130 °С по методу кольца и шара (КиШ), а затем пластифицируют окисленный продукт экстрактами селективной очистки масел, получая в результате битумы марок БНД.

В перспективе для повышения экономичности битумных установок, сокращения транспортных расходов по доставке битума и улучшения его качества целесообразно строить установки производительностью 100...250 тыс. т битума в год и доставлять его к месту использования в горячем виде автобитумовозами на расстояние до 300 км.

7.3.2. Улучшение свойств вязких битумов

В разных странах проводятся многочисленные исследования, направленные на повышение качества битумов за счет введения добавок полимеров, ПАВ, пластификаторов, специальных структурообразующих добавок. Эти работы вызваны необходимостью решения следующих проблем:

- изменение свойств битумов таким образом, чтобы их можно было эффективно использовать в тех технологических и эксплуатационных условиях, где они непригодны или малоэффективны;
- экономия дефицитных по разным причинам в данном регионе или на данном объекте органических вяжущих без ухудшения качества готового материала и конструкции, где они применяются;
- расширение ресурсов органических вяжущих материалов, в частности, для увеличения объемов строительства дорог с твердым покрытием, решения социальных вопросов и снижения транспортных расходов;
- повышение качества традиционных органических вяжущих материалов для повышения межремонтных сроков службы, в частности дорожных одежд, а следовательно, экономии органических вяжущих и минеральных материалов, трудо- и энергозатрат за счет уменьшения объемов ремонтных работ на дорогах, мостах и аэродромах, а также на объектах промышленного, гражданского и гидротехнического строительства;

■ поиск и разработка новых видов органических вяжущих материалов для упрощения технологии их получения, расширения области применения органических вяжущих как по климатическим зонам, так и по конструкциям, упрощения транспортировки вяжущих к местам потребления, увеличения сети дорог с твердым покрытием.

Все перечисленное продиктовано нуждами практики, поэтому модифицированные битумы находят широкое применение в дорожном строительстве многих стран. Однако в СНГ объемы применения таких материалов весьма ограничены. При этом следует отметить, что добавки, как правило, выбираются эмпирически, без должного научного обоснования, часто оказываются неэффективными, а иногда приводят к отрицательному эффекту. В связи с этим возникла необходимость разработки теоретических основ получения и применения комплексных органических вяжущих для дорожного строительства.

Исходя из известного принципа, согласно которому качество асфальтобетонов определяется главным образом качеством битумных вяжущих, исследователи и дорожники-практики многих развитых стран пришли к выводу о целесообразности замены обычных битумов битумами, модифицированными полимерами (БМП). Начиная с 1960-х гг. это направление битумных технологий развивалось достаточно интенсивно, но бессистемно: использовались разнообразные полимеры (на первом этапе — отходы производства), шел поиск технологий их совмещения с битумом. Только в конце XX в. на Западе были сформулированы основные положения получения битумов, модифицированных полимерами:

■ эффективными модификаторами битумов являются термоэластопластические полимеры;

■ замена в разнообразных асфальтобетонах обычного битума битумом с добавкой полимера повышает их долговечность;

■ для достижения высокого уровня качества БМП перспективным является непосредственное введение полимеров в битум;

■ выбор компонентов БМП должен учитывать соотношение параметров его качества и стоимости.

Учитывая важность вопроса для развития дорожной отрасли, в странах ЕС (2005 г.), России (2003 г.), Украине (2007 г.) разработаны государственные стандарты на эти вяжущие. Более 10 % битумов, используемых в индустриально развитых государствах, содержат полимерные добавки.

По объемам применения полимеры размещаются в следующем порядке: термоэластопласты типа стирол-бутадиен-стирол (СБС); термопласты типа этиленвинилацетат, полиизобутилен, полипропилен, разнообразные блоксополимеры; полимерные латексы; терполимеры типа этиленглицидилакрилат.

Термоэластопласты, благодаря своему составу и структуре, при других равных условиях отличаются высокой эластичностью (способностью к большим обратимым деформациям после прекращения деформирования или после снятия нагрузки). Содержание таких полимеров в БМП может достигать 3...10 %. *Термопласты* обладают подобными свойствами, но им присуща низкая эластичность, а также меньшая деформативность при низких температурах. Их расход в БМП 5...12 %. *Латексы* являются водными дисперсиями каучуков (содержат около 30 % воды), технологически они более приемлемы для изготовления битумополимерных эмульсий. Их содержание в эмульсиях около 3 %. *Терполимеры* отличаются способностью вступать в реакцию с компонентами битумов (асфальтосмолистыми веществами), за счет чего приемлемые технические свойства БМП достигаются при меньших расходах (около 1,5...2,2 %).

Принципиальный механизм регулирования свойств битума разными полимерами одинаковый. Он заключается в создании более-менее развитой сетки полимера в битуме, в который добавляется. Результаты модификации в каждом отдельном случае зависят от совместимости полимера и битума, их количественного соотношения, температурных режимов приготовления.

Накопленный опыт свидетельствует о преимуществах асфальтобетонов на модифицированных полимерами битумах по сравнению с обычными асфальтобетонами в отношении: прочности и, в частности, сдвигоустойчивости; температуры хрупкости (при соответствующем содержании полимера); ус-

тойчивости в водной среде и, в конечном итоге, долговечности асфальтополимербетонных покрытий. В то же время обеспечение этих преимуществ требует усложнения технологической подготовки вяжущих, приводит к удорожанию вяжущего из-за высокой стоимости полимеров. При этом неизбежен значительный дополнительный расход энергоресурсов, необходимых для проведения всех технологических процессов при температурах на 15...25 °С выше, чем в случае традиционных битумов и асфальтобетонов. Эти затраты могут быть компенсированы за счет удлинения межремонтных сроков асфальтополимербетонного покрытия и уменьшения объемов его ремонта. К сожалению, подтвердить справедливость последнего утверждения на основе производственных данных в настоящее время достаточно проблематично.

Применению битумов, модифицированных полимерами, в каждом конкретном случае должно предшествовать технико-экономическое обоснование, поскольку стоимость модифицированного битума намного превосходит стоимость обычного битума.

Для улучшения свойств вязких битумов используют ряд способов.

Общепринятой практикой в ряде стран стал способ, когда в состав вязких битумов вводят *добавки из полимерных материалов или побочных продуктов их производства* в количестве 1...3 %, увеличивающие прочность пленки битума. Необходимым условием применения таких добавок является их растворимость в битуме, обеспечивающая однородность структуры модифицированного битума. В качестве добавок используют побочные продукты производства полиэтилена, полипропилена, полистирола и поливинилхлорида.

Для повышения деформативности битума при отрицательных температурах (для предотвращения появления на покрытиях трещин) с одновременным обеспечением его сдвиговой прочности при высоких летних температурах покрытий (избежание деформаций в виде волн и колей) в состав битума вводят *побочные продукты производства синтетических смол и каучуков* в количестве 2...5 % от массы битума. Здесь также предъявляется требование хорошей совместимости с биту-

мом — добавки должны набухать и растворяться в нем до получения однородной массы.

Помимо требований к температурно-вязкостным сдвиговым свойствам, к битумам предъявляется также одно из основных требований — обеспечить высокую адгезию к минеральным материалам. Для этого в их состав вводят поверхностно-активные вещества (ПАВ). По знаку (полярности) функциональных групп ПАВ делят на анионактивные (со знаком «–») и катионактивные (со знаком «+»). Поэтому для улучшения прилипания битума к поверхности основных горных пород (на которой преобладает положительный заряд) в состав битума вводят анионактивные ПАВ, а для усиления адгезии битума к поверхности кислых пород (наиболее распространенных) — катионактивные ПАВ.

При смачивании битумом поверхности каменных материалов молекулы ПАВ ориентируются полярной функциональной группой к поверхности минерального материала, а радикалы — к пленке битума. При этом происходит взаимодействие электрических зарядов противоположного знака, что способствует сцеплению битума с каменным материалом. Механизмы такого повышения адгезионного взаимодействия представлены на рис. 7.9.

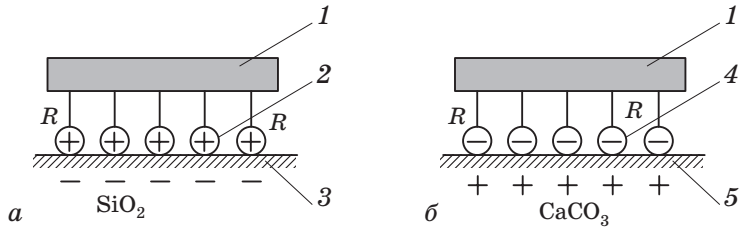


Рис. 7.9. Схема прилипания поверхности битума с ПАВ к поверхности каменного материала:
а — прилипание пленки битума с ПАВ катионного типа к поверхности кислого каменного материала; *б* — прилипание пленки битума с ПАВ анионного типа к поверхности основного каменного материала; *1* — битум; *2* — молекулы ПАВ катионного типа; *3* — каменный материал из кислых горных пород (кварцевый песок, гранит); *4* — молекулы ПАВ анионного типа; *5* — каменный материал из основных (карбонатных) горных пород (известняк, доломит)

Желательно выбирать такие ПАВ, которые в дальнейшем химически взаимодействуют с поверхностью каменного материала (хемосорбционная адгезия), что обеспечивает длительную водостойкость пленки битума.

Наиболее характерными представителями анионактивных веществ являются мыла карбоновых кислот, катионактивных — соли ароматических и алифатических аминов.

Поскольку некоторые ПАВ могут значительно ухудшить свои свойства под воздействием повышенных температур при нагреве битума, нагревать битум с ПАВ следует строго в соответствии с нормативными документами. Избыток ПАВ в битуме или его недостаточное количество ухудшает адгезионные свойства битума. Поэтому добавки ПАВ вводят в битум также строго нормированно.

Для качественного улучшения структуры и свойств дорожных битумов самым эффективным способом, позволяющим получать качественно новое органическое вяжущее, является ***модификация битумов полимерами***.

К модифицированным битумным вяжущим относятся нефтяные вязкие битумы, содержащие до 10 % (по массе) полимерных добавок (модификаторов).

Согласно СТБ 1220–2000 «Битумы модифицированные дорожные. Технические условия» модифицированные битумы в зависимости от назначения и глубины проникания иглы подразделяются на марки:

- БМА 50/70, БМА 70/100, БМА 100/130 — для приготовления горячих асфальтобетонных смесей;
- БМП 100/150, БМП 150/200 — для устройства поверхностных обработок;
- БММ 130/150 — для устройства битумополимерных прослоек (мембран) по цементобетонным покрытиям; дорожным основаниям, укрепленным минеральным вяжущим; старым асфальтобетонным покрытиям с сеткой температурных трещин; гравийно-эмульсионным основаниям и покрытиям перед устройством последующего конструктивного слоя или фрикционного слоя износа.

Условное обозначение модифицированного битума при записи в других документах и заказе должно состоять из наи-

менования, марки модифицированного битума и обозначения настоящего СТБ (например, БМА 50/70 СТБ 1220–2000.

По физико-химическим показателям модифицированные битумы должны соответствовать нормам, приведенным в табл. 7.4.

Для производства модифицированных битумов следует применять битумы нефтяные дорожные вязкие марок БНД (БН) 60/90, БНД (БН) 90/130 и БНД (БН) 130/200 по ГОСТ 22245–90 и битумы марок БД 60/90, БД 90/130 и БД 130/200 по СТБ 1062–97.

В качестве *модификаторов* битума применяют эластомеры: термоэластопласты марок ДСТ-30-01, ДСТ-30Р-20ПС, ДСТ-30Р и их зарубежные аналоги; синтетический каучук этиленпропиленовый, синтетический каучук СКС, а также комбинации каучуков, выпускаемых по соответствующим нормативным документам.

В качестве *пластификаторов* применяют: экстракты селективной очистки масел, экстракты фенольной очистки масел, индустриальные масла марок И-20А, И-30А, И-40А, И-50А, масло ПН-6, сырье для производства нефтяных вязких дорожных битумов.

В качестве *ПАВ* применяют амины алифатические (C_{17}–C_{20}) технические или катионоактивные ПАВ на основе жирных алифатических аминов зарубежного производства.

Для производства модифицированных битумов допускается использовать другие эластомеры, пластификаторы и ПАВ, применение которых согласовано с органами Госнадзора.

В Беларуси построено государственное предприятие «Вёска», которое работает с 1997 г. Основные виды выпускаемой продукции: битум нефтяной для верхнего слоя дорожного покрытия (60 000 т/год); эмульсия битумная катионная (50 000 т/год); битумы модифицированные (32 000 т/год); мастика битумная.

Производимая продукция используется при строительстве и ремонте дорог в Республике Беларусь. Отдельные виды продукции используются в странах СНГ.

Структура предприятия включает установку по производству битума, цех битумных эмульсий и битумно-полимерных вяжущих.

Физико-химические показатели

Показатель	Норма для модифицированных	
	БМА 50/70	БМА 70/100
Глубина проникания иглы, 0,1 мм, при 25 °С	50...70	71...100
Температура размягчения по кольцу и шару, °С, не ниже	55	52
Температура хрупкости по Фраасу, °С, не выше	–20	–20
Растяжимость, см, не менее, при 0 °С	9	9
Эластичность, %, не менее, при 13 °С	55	50
Сцепление с минеральным материалом	В соответствии с (покрытие не менее 3/4	
Удерживающая способность при ударе, °С: при максимальной отрицательной температуре, не выше	–20	–20
при максимальной положительной температуре, не ниже	—	—
Показатели физико-химических свойств после прогрева (163 °С/300 мин):		
изменение температуры размягчения по кольцу и шару, °С, не более	5	5
глубина проникания иглы, % от первоначальной, не менее, при 25 °С	60	60
эластичность, %, не менее, при 13 °С	50	50

Таблица 7.4

свойств модифицированных битумов

битумов марок				Метод испытания
БМА 100/130	БМП 100/150	БМП 150/200	БММ 130/150	
101...130	101...150	151...200	130...150	ГОСТ 11501—78
50	55	51	60	ГОСТ 11506–73
–21	–23	–23	–23	ГОСТ 11507–78
11	11	13	15	ГОСТ 11505–75
50	50	50	85	По 7.3 СТБ 1220–2000
контрольным образцом № 2 поверхности минерального материала)				ГОСТ 11508–74 (метод А)
–20 —	–20 +70	–20 +70	–20 —	По 7.4 СТБ 1220–2000
6	7	7	7	ГОСТ 11506–73 с дополнением по 7.5 По 7.5 ГОСТ 11506–73
60	60	60	60	ГОСТ 11501–78 с дополнением по 7.5
50	50	50	60	По 7.5 ГОСТ 11506–73

7.3.3. Органические вяжущие, улучшенные добавками

Для улучшения свойств органических вяжущих широко применяются различные добавки.

Органические вяжущие с добавками поливинилхлорида (ПВХ), полистирола (ПС), полиэтилена (ПЭ), эпоксидных и кумароновых смол и отходов при их производстве. Эти добавки применяют в количестве 0,5...3 %. Они улучшают реологические свойства, повышают тепло- и водоустойчивость вяжущих. Особенно эффективны для дегтей. Наиболее перспективным, учитывая стоимость, является применение *фурановых смол*, которые применяются с кислотными отвердителями.

Органические вяжущие с добавками каучуков. К этим добавкам относится большая группа синтетических (хлоропреновых, бутадиенстирольных) каучуков, обладающих высокой эластичностью. Для их совмещения вяжущее нагревают до жидкого состояния и смешивают с указанными добавками. Добавка каучука в зависимости от требований колеблется от 2 до 8 %, что существенно повышает свойства каучукобитумных вяжущих.

В нашей стране и за рубежом широко применяют регенерированную резину, резиновую крошку, получаемую при вторичной переработке старых автомобильных покрышек. Измельченную резину в порошкообразном (диспергированном) состоянии вводят в битум в количестве 3...5 % при температуре 150...180 °С и тщательно перемешивают. При этом происходит набухание резиновых частиц и образуется битумно-резиновая дисперсия, которая отличается высокой растяжимостью при 0 °С. Она придает асфальтобетону большую упругость, уменьшает трещинообразование и скользкость, а также замедляет его старение.

Затраты, связанные с применением каучуков, увеличиваются на 20 %, но они окупаются увеличением более чем в половину срока службы покрытия.

7.3.4. Битумы нефтяные жидкие

Основным недостатком многих органических вяжущих является их высокая вязкость при обычных условиях. Поэтому при использовании требуется их нагревание до температур выше 100 °С. Кроме того, вязкие битумы не обеспечивают хорошего сцепления с влажной поверхностью каменных материалов.

Поэтому при строительстве дорожных усовершенствованных покрытий и оснований применяют ***жидкие нефтяные битумы***, которые можно применять подогретыми до температуры лишь около 100 °С, а также холодными (при укреплении грунтов) с температурой 15...20 °С.

Характерной особенностью жидких битумов является их способность с течением небольшого периода времени загустевать непосредственно в дорожном покрытии или основании и приобретать вязкость, почти равную вязкости исходного вязкого битума. По мере загустевания жидкого битума возрастает прочность покрытия.

Вязкость жидких битумов определяют с помощью стандартного вискозиметра путем измерения времени истечения (с) определенного количества жидкого материала (обычно 50 $см^3$) через калибровочное отверстие (чаще 5 или 10 мм) при соответствующей температуре. Например, для жидких битумов вязкость составляет $C_{60}^{5} = 25...200$ с, где верхняя цифра в обозначении — диаметр сточного отверстия в мм, нижняя — температура испытания в градусах Цельсия.

В зависимости от скорости загустевания и вязкости нефтяные битумы подразделяются на два класса:

- густеющие со средней скоростью (СГ);
- медленногустеющие (МГ и МГО).

Аббревиатура МГО обозначает «медленногустеющий остаточный битум», названный так по технологии его получения.

Влияние времени на изменение вязкости жидких битумов в период их работы в дорожном покрытии показано на рис. 7.10.

Рис. 7.10. Изменение вязкости битумов за период работы в дорожных покрытиях:
1 — вязкие битумы; *2* — жидкие битумы среднегустеющие; *3* — медленногустеющие

Достаточная прочность пленки жидких битумов достигается для битумов класса СГ через 20 сут., МГ — 30 сут., МГО — 45 сут.

Жидкие нефтяные дорожные битумы готовят путем разжижения вязких битумов (БНД 40/60, БНД 60/90 и БН 60/90) легкими нефтяными продуктами (лигроином, керосином, крекинг-остатком, нефтяными маслами) с добавлением ПАВ или других добавок.

Как правило, в качестве разжижителей при изготовлении битумов класса СГ используют керосиновую фракцию нефти, а битумов класса МГ — фракцию дизельного топлива. Битумы класса МГО (медленногустеющие остаточные) получают при переработке нефти на атмосферно-вакуумной трубчатой установке.

Жидкие дорожные нефтяные битумы должны соответствовать требованиям ГОСТ 11955–82 «Битумы нефтяные жидкие» (табл. 7.5).

Таблица 7.5

Физико-химические показатели свойств нефтяных жидких битумов

Показатель	Нормы для марок								
	СГ 40/70	СГ 70/130	СГ 130/200	МГ 40/70	МГ 70/130	МГ 130/200	МГО 40/70	МГО 70/130	МГО 130/200
Условная вязкость по вискозиметру с отверстием 5 мм при 60 °С	40...70	71...130	131...200	40...70	71...130	131...200	40...70	71...130	131...200
Количество испарившегося разжижителя, %, не менее	10	8	7	8	7	5	—	—	—
Температура размягчения остатка после определения количества испарившегося разжижителя, °С, не ниже	37	39	39	28	29	30	—	—	—
Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °С, не ниже	45	50	60	100	110	110	120	160	180
Испытание на сцепление с мрамором или песком	Выдерживают в соответствии с контрольным образцом								

7.4. Битумные эмульсии

Эмульсии битумные дорожные **(*Э.б.д.*)** — жидкие дисперсные системы, в которых одна жидкость — битум (дисперсная фаза) в виде мельчайших капель размером 0,1 мкм диспергирована в другой жидкости — водной среде. Э.б.д. в СССР начали применять в 1930 г.; в настоящее время их применяют в странах СНГ и Беларуси.

Диспергированные частицы фазы в эмульсии существуют автономно: битумы, являющиеся неполярными веществами, не растворяются в полярной жидкости — воде, поэтому они могут смешиваться с водой только с образованием эмульсии. Образование и устойчивость Э.б.д. достигается введением эмульгаторов — ПАВ или тонкомолотых твердых порошков. Эти вещества создают защитные оболочки вокруг частиц дисперсной фазы, предотвращая коагуляцию. Механизм создания «защитной» оболочки вокруг битумной частицы в случае применения ПАВ представлен на рис. 7.11.

Молекулы ПАВ, состоящие из полярной и неполярной частей, ориентируются на границе раздела битум—вода таким образом, что неполярной частью они обращены к биту-

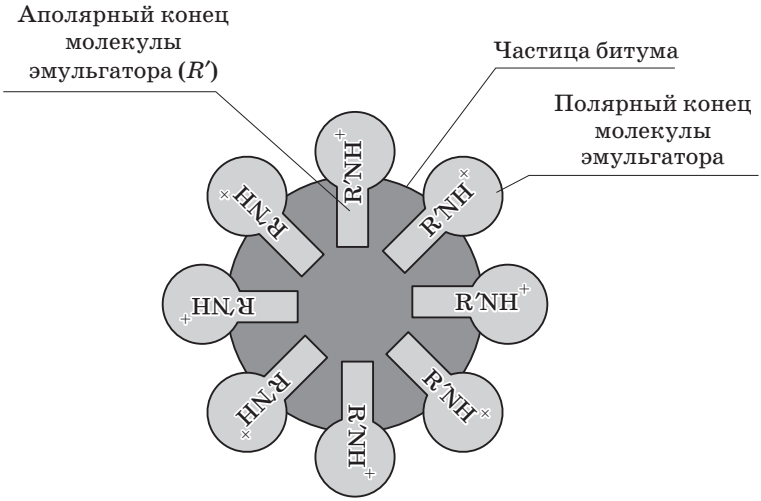


Рис. 7.11. Частица битума в катионной эмульсии

му, а полярной — к воде. Вследствие такой ориентации ПАВ и диссоциации их полярной группы, частицы дисперсной фазы приобретают электрический заряд (при анионактивном эмульгаторе — отрицательный, при катионактивном — положительный). Одноименно заряженные частицы фазы отталкиваются, что препятствует их слипанию и обусловливает бóльшую устойчивость эмульсии.

Твердые минеральные эмульгаторы прилипают к поверхности диспергированных частиц битума и образуют на границе их раздела с водой защитные оболочки.

Э.б.д. содержат 40...60 % битума. Эмульсии, содержащие более 60...70 % битума, называют *высококонцентрированными*.

В зависимости от свойств и содержания эмульгатора, а также количества битума можно получать эмульсии двух типов:

- прямые, когда капли битума диспергированы в воде;
- обратные, когда вода диспергирована в битуме.

В дорожном строительстве применяются главным образом прямые эмульсии. В качестве эмульгатора используют мыла нафтеновых, сульфонафтеновых, смоляных органических кислот, сульфитно-дрожжевую бражку, а также твердые вещества: тонкие порошки глин, извести, цемента, каменного угля, сажи.

Процесс приготовления Э.б.д. включает разогрев битума (90...120 °С), приготовление эмульгатора и диспергирование битума в воде с добавлением водного раствора эмульгатора (рис. 7.12).

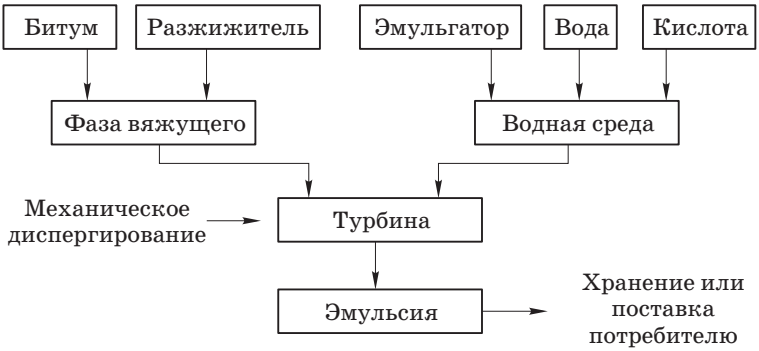


Рис. 7.12. Схема приготовления битумной эмульсии катионного типа

Битумные эмульсии применяются:

- для обеспыливания дорог;
- укрепления грунтов, используемых для устройства оснований дорожных одежд;
- ремонта и профилактической защиты покрытий;
- устройства различных подгрунтовок;
- ухода за твердеющим бетоном.

При применении Э.б.д. необходимо учитывать длительность формирования структуры материала на их основе, что связано с характером распада эмульсии и испарением воды. В зависимости от погодных условий этот процесс может длиться часами.

7.5. Перевозка, подготовка, контроль и хранение органических вяжущих материалов

На каждую партию поставляемых органических вяжущих нефтеперерабатывающий завод (НПЗ) прилагает паспорт, в котором содержится:

- наименование НПЗ и его адрес;
- характеристика поставляемого вяжущего и его марка;
- номер партии и ее масса;
- дата отправки.

При перевозке и хранении органические вяжущие должны быть защищены от возможного загрязнения, обводнения и потерь.

Перевозка. Перевозку твердых (строительных) битумов осуществляют в обычных крытых вагонах и платформах. Вязкие битумы перевозят в цистернах, оборудованных змеевиками для разогрева.

Для перевозки битума в разогретом состоянии на расстояние до 300 км используют автобитумовозы с обогревом. Они особенно удобны, если доставляемый битум сразу перекачивается в наземные хранилища. При этом на АБЗ или битумной базе нет необходимости устраивать железнодорожные пути и

специальные тепловые агрегаты для разогрева битума при его сливе в хранилище.

В настоящее время за рубежом значительная часть АБЗ (примерно 75 %) работают «с колес».

При разгрузке цистерн и транспортировании по трубам температура разогрева органических вяжущих может быть принята в следующих пределах: нефтяные вязкие битумы 90...100 °С, битумы жидкие — 30...50 °С.

Подогрев вяжущих. Органические вяжущие материалы подогревают до рабочей температуры 150...180 °С, при которой они легко смачивают минеральные материалы во время смешения, пропитки или поверхностной обработки дорожных покрытий. При необходимости к вяжущим материалам добавляют разжижители.

Нагревание органических материалов выше требуемой температуры недопустимо, так как это приводит к интенсивному испарению летучих фракций, процессам деструкции высокомолекулярных органических соединений (изменению группового состава исходного битума и основных его физико-механических свойств (температуры размягчения, хрупкости, растяжимости и др.).

Органические вяжущие разогревают водяным паром, горячим маслом, циркулирующим в трубах, и электричеством (тэны).

При изготовлении разжиженных битумов подогревают только вязкий битум, а разжижители добавляют в холодном состоянии. Если разжижитель вязкий и содержит воду (сырая смола), его подогревают отдельно и до смешения выпаривают воду.

В процессе тепловой подготовки вяжущих компоненты тщательно перемешивают с помощью насоса или специальной мешалкой.

Технический контроль. Состоит из следующих операций:

- проверка рабочей температуры вяжущего при подогреве;
- соблюдение требуемой продолжительности нагрева вяжущего;

■ контроль правильности дозирования исходных материалов при приготовлении смешанных битумов.

Для контрольных испытаний свойств материала отбирают среднюю пробу и испытывают ее в лаборатории в соответствии с государственным стандартом.

Приемка доставленных органических вяжущих. Приемку осуществляет лаборатория потребителя путем определения массы партии и данных контрольных испытаний, сравнивая их с прилагаемым паспортом на прибывший материал.

Массу материала в цистернах и бункерных полувагонах определяют взвешиванием или по степени заполнения емкости тары (V) и истинной плотности материала ($\rho_и$):

$$m = \rho_и V. \qquad (7.5)$$

Хранение органических вяжущих. Хранение вяжущих организуют в специально устроенных надземных резервуарах с подводом водяного пара, нагретых масел или с электрическими нагревателями для поддержания требуемой температуры вяжущих, а также с подводом сжатого воздуха для перемешивания вяжущих в емкостях.

Суммарная вместимость резервуаров зависит от расчетного потребления вяжущих. Емкость резервуаров колеблется от 1000 до 5000 м^3. Для облегчения слива днище резервуара делают наклонным.

Для внутризаводского транспортирования битума применяют шестеренчатые насосы.

Трубопроводы и насосы тщательно изолируют от потери тепла, оборудуют паровыми рубашками, специальной теплоизоляцией или применяют электрообогрев.

Основные мероприятия по охране труда. Органические вяжущие горючи и требуют соблюдения противопожарной безопасности и правил охраны труда при работе с ними. Рабочие должны быть предварительно проинструктированы по общей охране труда и охране труда на рабочем месте. За состоянием здоровья рабочих устанавливается врачебный контроль.

Котлы для разогрева вяжущих и асфальтосмесители во избежание вредных пылегазовых выбросов необходимо оборудовать вентиляционными устройствами и заземлить.

Для защиты от ожогов при внезапном воспламенении разогреваемых материалов рабочие, обслуживающие котлы, должны быть снабжены спецодеждой, а котлы оборудованы крышкой на загрузочных люках и спускными лотками. Кроме того, котлы для разогрева необходимо снабжать противопожарным оборудованием.

За состоянием оборудования для разогрева, котлами, трубопроводами должен быть установлен технический надзор.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Как классифицируют органические вяжущие?

2. Назовите состав, свойства и структуру вязких битумов.

3. Какие существуют способы получения нефтяных битумов?

4. Нарисуйте принципиальную схему производства вязких битумов.

5. Назовите основные способы улучшения свойств вязких битумов.

6. Охарактеризуйте назначение, состав и применение добавок к органическим вяжущим.

7. Что представляют собой жидкие нефтяные битумы, как их получают? Назовите их основные свойства.

8. Что такое битумная эмульсия? Как получают битумные эмульсии (нарисуйте схему приготовления)?

9. Как осуществляют перевозку, подготовку, контроль и хранение органических вяжущих материалов?

10. Назовите основные мероприятия по охране труда при работе с органическими вяжущими.

8 АСФАЛЬТОБЕТОН И ДРУГИЕ БИТУМОМИНЕРАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

8.1. Классификация битумоминеральных материалов

Асфальтобетонная смесь **(*АБС*)** — рационально подобранная смесь, состоящая из крупного (щебень, гравий) и мелкого (песок) заполнителей, минерального порошка и битума.

Асфальтобетон **(*АБ*)** — дорожностроительный материал, получаемый в результате отвердевания уплотненной рационально подобранной асфальтобетонной смеси с нормированной температурой приготовления. При отсутствии в смеси крупного заполнителя (щебня, гравия) получаемый строительный материал называется ***песчаным асфальтом*** или ***асфальтовым раствором***.

К ***битумоминеральным материалам*** **(*БММ*)**, кроме асфальтобетона, относятся материалы, получаемые:

- смешением необходимых компонентов на дороге или в установке;
- методом пропитки;
- методом поверхностной обработки.

Сюда относятся также влажные органоминеральные смеси (ВОМС) (рис. 8.1).

Асфальтобетон отличается от других битумоминеральных материалов более высокой плотностью, прочностью и водостойкостью, которые обусловлены наличием в его составе тонкодисперсного минерального порошка и точным дозированием компонентов в асфальтосмесительных установках.

Асфальтобетон применяют для строительства покрытий на дорогах всех категорий, в том числе и с самой высокой интенсивностью движения и тяжелыми транспортными нагрузками.

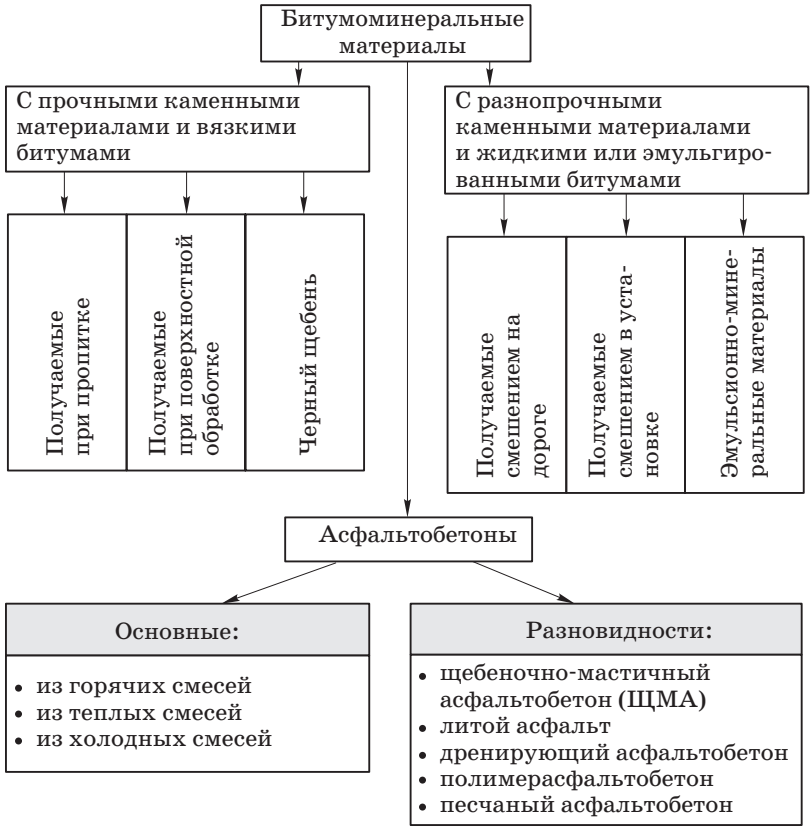


Рис. 8.1. Общая схема классификации битумоминеральных материалов (по Н.В. Горелышеву)

Благодаря полной механизации получения, укладки и уплотнения асфальтобетонных смесей, а также удобству эксплуатационного содержания дорожных покрытий с их применением, асфальтобетон получил самое широкое распространение как дорожно-строительный материал (95 %). В настоящее время в Беларуси действуют стандарты на этот вид материала: СТБ 1033–2004 «Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия» и СТБ 1115–2004 «Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытаний».

8.2. Классификация асфальтобетонных смесей

В зависимости от вида применяемых минеральных материалов АБС подразделяются:

- на щебеночные (в том числе щебеночно-мастичные);
- гравийные;
- песчаные.

В зависимости от вязкости битума и условий применения АБС подразделяют:

- на горячие — приготовляемые с использованием вязких битумов и применяемые с температурой не ниже 120 °С непосредственно после приготовления;
- теплые — приготовляемые с использованием как вязких, так и жидких битумов, применяемые с температурой не ниже соответственно 120 и 70 °С;
- холодные — приготовляемые с использованием жидких битумов, допускаемые к длительному хранению и применяемые с температурой не ниже 5 °С.

Вид АБС по вязкости битума принимают в зависимости:

- от характера движения автомобилей;
- конструкции дорожной одежды;
- наличия строительных материалов;
- климатических условий района строительства и условий производства работ.

В зависимости от наибольшего размера зерен минеральных материалов АБС подразделяются на следующие группы:

а) для горячих и теплых АБС:

- крупнозернистые — размер зерен до 40 мм;
- мелкозернистые — до 20 мм;
- песчаные — до 5 мм;

б) для холодных АБС:

- мелкозернистые — размер зерен до 20 мм;
- песчаные — до 5 мм.

Асфальтобетон из горячих смесей наиболее широко применяется для устройства верхних и нижних слоев покрытия

практически во всех климатических районах. Покрытия из него устойчивы к воздействию транспорта и атмосферных факторов.

Асфальтобетон из теплых смесей обладает меньшими прочностью и водостойкостью, чем из горячих, но более трещиностоек. Последнее свойство определяет его применение в холодном климате. Теплые асфальтобетонные смеси хорошо укладываются и уплотняются при пониженных температурах.

Асфальтобетон из холодных смесей менее устойчив к воздействию механических нагрузок и атмосферных факторов, чем асфальтобетон из горячих и теплых смесей. Особенностью таких смесей является способность длительное время оставаться рыхлыми, что позволяет их готовить впрок (до 8 мес.). Этот вид материала применяют для покрытий местных дорог с малой интенсивностью движения и особенно широко — для ямочных ремонтов в экстренных случаях.

Крупнозернистые асфальтобетонные смеси применяют только для устройства нижнего слоя покрытия, поскольку его шероховатая поверхность и пористая структура обеспечивают хорошее сцепление с верхним слоем.

Асфальтобетоны из горячих и теплых смесей, в зависимости от значения остаточной пористости, подразделяются:

- на плотные — с остаточной пористостью от 1 до 5 % включительно;
- пористые — свыше 5 до 12 % включительно;
- высокопористые — свыше 12 до 18 % включительно.

Смеси, в зависимости от содержания в них щебня или гравия, вида песка, качественных показателей, подразделяются на типы и марки (табл. 8.1).

По качеству составляющих материалов и физико-механическим свойствам асфальтобетон подразделяется на ***марки***:

I, II, III — для горячего плотного асфальтобетона;

I, II — для горячего пористого и высокопористого асфальтобетона;

I, II — для холодного асфальтобетона.

Таблица 8.1

Классификация смесей

Тип смеси		Количество щебня (гравия), % по массе	Вид песка	Марка смеси	
горячая и теплая	холодная			горячая и теплая	холодная
Плотные асфальтобетоны					
С	—	Щебень свыше 65 до 80 включительно	Дробленый или из отсева дробления; природный	I	—
А	—	Щебень свыше 50 до 65 включительно		I, II	—
Б	$Б_х$	Щебень или гравий свыше 35 до 50 включительно		I, II, III	I, II
В	$В_х$	Щебень или гравий свыше 20 до 35 включительно		II, III	II
Г	$Г_х$	—	Природный — до 30 %; дробленый или из отсева дробления	I, II, III	I
Д	$Д_х$	—	Дробленый или из отсева дробления — до 30 %; природный	II, III	II
Пористые асфальтобетоны					
Крупно- и мелкозернистая	—	Щебень или гравий свыше 35 до 73 включительно	Дробленый или из отсева дробления; природный	I, II	—
Высокопористые асфальтобетоны					
Крупно- и мелкозернистая	—	Щебень или гравий свыше 35 до 73 включительно	Дробленый или из отсева дробления; природный	I, II	
Песчаная	—	—			

Условные обозначения смеси при заказе должны состоять из сокращенного обозначения:

- первая буква — указание материала заполнителя: Щ — щебень, Г — гравий, П — песок;
- вторая буква — указание крупности материала заполнителя: К — крупнозернистая, М — мелкозернистая;
- третья буква — указание типа смеси: плотные смеси — А, Б, В, Г, Д; щебеночно-мастичные смеси — С;
- третья и четвертая буквы для пористых и высокопористых смесей — соответственно П и ВП;
- индексы г, т, х — соответственно для горячих, теплых и холодных видов смесей. Для щебеночно-мастичных смесей индекс обозначает вид стабилизирующей добавки (например, ц — целлюлоза);
- марка смеси — I, II, III;
- предел прочности при сдвиге при температуре 50 °С ($R_{сдв}$, МПа);
- обозначение данного стандарта.

Примеры условного обозначения АБС:

1) щебеночная мелкозернистая горячая плотная смесь типа А марки I **с пределом прочности при сдвиге при температуре** 50 °С не менее 2,75 МПа: $ЩМА_{г}$ — I/2,75 СТБ 1033–2004;

2) гравийная крупнозернистая теплая плотная смесь типа Б марки II: $ГКБ_{т}$ — II СТБ 1033–2004;

3) песчаная холодная плотная смесь типа Д марки II: $ПД_{х}$ — II СТБ 1033–2004;

4) гравийная крупнозернистая теплая высокопористая смесь марки II: $ГКВП_{т}$ — II СТБ 1033–2004;

5) щебеночно-мастичная мелкозернистая горячая плотная смесь с пределом прочности при сдвиге при температуре 50 °С не менее 2,2 МПа: $ЩМС_{ц}$ — I/2,2 СТБ 1033–2004.

Плотные мелкозернистые асфальтобетоны применяют для устройства верхних слоев покрытий на дорогах с тяжелым интенсивным движением, а крупнозернистые плотные — для нижних слоев.

Пористые и высокопористые асфальтобетоны, как правило, применяют для устройства слоев только оснований.

Асфальтобетоны типов А и Б предназначены для дорог высоких технических категорий (I и II), асфальтобетон типа В — для дорог не выше III категории.

В зависимости от вида применяемого песка различают два вида песчаного асфальтобетона:

- тип Г — на основе песка из отсевов дробления или смесей отсевов дробления с природным песком при содержании последнего не более 30 % по массе;
- тип Д — на основе природного песка или смесей природных песков с отсевами дробления при содержании последних не менее 70 % по массе.

Асфальтобетон типа Г допускается использовать на дорогах не выше III категории.

Асфальтобетон типа Д используют главным образом на дорогах не выше IV технической категории, а также при благоустройстве территорий (дворов, местных проездов и т.п.) в городах.

В связи с увеличением интенсивности движения и ростом осевых нагрузок грузовых автомобилей дорожные покрытия даже из плотных щебенистых асфальтобетонов начали давать сдвиговые деформации в виде волн и колей. В качестве меры против этого разработан новый тип асфальтобетона — ***щебеночно-мастичный (ЩМА)***.

Он был разработан в 1960-х гг. в Германии в центральной лаборатории компании «Strabog — Bau AG» для борьбы с повреждениями, вызываемыми транспортом с шипованными шинами. Кроме того, разработчики стремились обеспечить сдвигоустойчивость покрытий в условиях транспортного движения при высоких температурах. В результате первоначально был создан асфальтобетон, состоящий приблизительно из 70 % прочного щебня и 30 % растворной части (мастики), который мог укладываться за один проход. Во избежание расслоения при транспортировке (вытекания вяжущего) в состав включалась стабилизирующая волокнистая целлюлозная добавка.

В зависимости от максимальной крупности применяемого щебня щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси делятся на следующие виды:

- ЩМА-10 — максимальная крупность щебня 10 мм;
- ЩМА-15 — максимальная крупность щебня 15 мм;
- ЩМА-20 — максимальная крупность щебня 20 мм.

Особенности ЩМА по сравнению с асфальтобетоном типа А можно проиллюстрировать данными табл. 8.2.

Таблица 8.2

Сравнение ориентировочных составов ЩМА и асфальтобетона типа А

Вид асфальтобетона	Состав по объему, %				
	Битум	Песок	Щебень	Минеральный порошок	Поры
ЩМА-15 (средняя толщина битумной пленки 12,2 мм; добавка волокон 0,4 %)	14	16	60	9	1
Тип А (средняя толщина битумной пленки 10,8 мм)	13	29	50	4	4

В 1968 г. ЩМА был впервые уложен на государственных дорогах Германии. Накопленный положительный опыт подтвердил эффективность работы покрытий из этого асфальтобетона и в 1984 г. ЩМА был признан официально для повсеместного применения.

В настоящее время технические нормативы на ЩМА существуют во всех странах мира. В России действует ГОСТ 31015–2002 «Смеси асфальтобетонные и асфальтобетоны щебеночно-мастичные. Технические условия», в Беларуси — СТБ 1033–2004.

Повышенное (по сравнению со стандартными асфальтобетонами) содержание битума препятствует прониканию влаги внутрь слоя, что повышает устойчивость к старению, водо- и трещиностойкость. В конечном счете значительно увеличивается долговечность покрытий. В некоторых зарубежных странах срок службы покрытий с применением ЩМА при интенсивном и тяжелом движении составляет более 10 лет.

Применение ЩМА экономически эффективно: он укладывается тонким слоем, а предварительная обработка ниже-

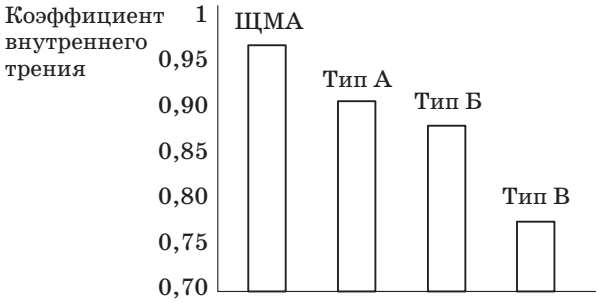


Рис. 8.2. Коэффициент угла внутреннего трения для различных типов асфальтобетона и ЩМА

лежащего слоя требует значительно меньшего количества битума или битумной эмульсии.

В ЩМА используется щебень кубовидной формы, что в сочетании с его высоким содержанием обеспечивает высокую сдвигоустойчивость (повышенный коэффициент угла внутреннего трения). Этот показатель у ЩМА значительно выше, чем у асфальтобетона типа А, который считается наиболее сдвигоустойчивым из стандартных видов асфальтобетона (рис. 8.2).

8.3. Материалы для асфальтобетонных смесей (по СТБ 1033–2004)

Для изготовления АБС применяют битумы, минеральные заполнители (песок, щебень), минеральный порошок и различные добавки.

8.3.1. Битум

Вид и качество вяжущего значительно влияет на качество получаемой асфальтобетонной смеси. Поэтому правильная оценка применяемого битума очень важна.

Для приготовления *горячих АБС* применяют следующие марки:

- вязких нефтяных дорожных битумов: БНД (БН) 60/90, БНД (БН) 90/130 (по ГОСТ 22245–90), БД 60/90, БД 90/130 (по СТБ 1062–97);

■ модифицированных битумов: БМА 70/100, БМА 100/130 (по СТБ 1220–2000).

Для приготовления *теплых смесей* следует применять:

■ вязкие битумы марок: БНД (БН) 130/200, БНД (БН) 200/300 (по ГОСТ 22245–90), БД 90/130, БД 130/200 (по СТБ 1062–97);

■ жидкие битумы марок СГ 130/200, МГ 130/200, МГО 130/200 (по ГОСТ 11955–82).

Для приготовления *холодных смесей* следует применять жидкие нефтяные дорожные битумы марок СГ 70/130, МГ 70/130, МГО 70/130 (по ГОСТ 11955–82).

Марки битумов выбирают в зависимости от вида смеси, категории дороги и категории нормальной нагрузки на покрытие аэродромов в соответствии с приложениями А и Б СТБ 1033–2004.

Особое внимание придается выбору битума при приготовлении АБС на дорогах **I и II категории с тяжелым транспортным** движением. Здесь рекомендуется применять дорожные битумы с катионактивными адгезионными добавками, обеспечивающими требуемые коэффициенты водостойкости при длительном водонасыщении в агрессивной среде после 28 сут. и морозостойкость после 50 циклов замораживания-оттаивания.

8.3.2. Шебень и гравий

Щебень — минеральный материал из монолитных горных пород дробленый и разгрохоченный по крупности на узкие фракции (СТБ 1311–2002), или получаемый дроблением гравия из плотных горных пород (ГОСТ 8267–93) и металлургических шлаков (ГОСТ 3344–83).

Для получения щебня используют главным образом граниты и известняки, значительно реже — другие породы. Не допускается применять щебень из глинистых (мергелестых) известняков, глинистых песчаников.

Гравий получают разгрохоткой по фракциям песчано-гравийных смесей (ГОСТ 8267–93).

Для приготовления плотных смесей марки I **требуется применять** щебень фракций (круглые сита), мм:

- от 2,5 до 5 включительно,
- свыше 5 до 10 включительно,
- свыше 10 до 15 включительно,
- свыше 15 до 20 включительно.

Не допускается применять смеси фракций свыше 5 до 20 мм.

Для приготовления плотных смесей марок II **и III, а также** для пористых и высокопористых смесей следует применять щебень или гравий следующих фракций (круглые сита), мм:

а) плотные смеси:

- от 5 до 10 включительно,
- свыше 10 до 15 включительно,
- свыше 15 до 20 включительно;

б) пористые и высокопористые смеси

- от 5 до 20 включительно,
- свыше 15 до 20 включительно,
- свыше 20 до 40 включительно.

Еще одним требованием является то, что для асфальтобетонов верхних слоев покрытий республиканских дорог, городских улиц, магистралей и аэродромов следует применять щебень с *ограниченным содержанием зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы*:

- для смесей типа А и щебеночно-мастичных (С) — до 15 %;
- типа Б — до 25 %;
- типа В — до 35 %.

Большое содержание лещадных зерен приводит к их дроблению при укатке.

Желательно, чтобы форма щебеночных частиц была кубовидной.

Загрязняющих примесей не должно быть больше 1,5 % по массе.

Петрографический состав щебня влияет на силу сцепления

с битумом и на шероховатость поверхности покрытия (последнее является важным показателем степени контакта колеса с покрытием).

Адгезия битума к поверхности известняковых зерен больше, чем гранитных.

Шероховатость поверхности асфальтобетонного покрытия с гранитным щебнем сохраняется более четырех лет, а покрытие на известняковом щебне становится скользким за один год эксплуатации.

8.3.3. Песок

Для приготовления асфальтобетонных смесей следует применять пески с модулем крупности более 1,5 (по ГОСТ 8736–85). Песок с модулем крупности от 1,0 до 1,5 может быть использован только в смеси с более крупным; при этом суммарный модуль крупности смеси песков должен быть более 1,5. Пылеватых и глинистых частиц в природном песке должно быть не более 3 % по массе.

Показатели свойств дробленых песков и песков из отсевов дробления горных пород и гравия, в зависимости от марки, типа и вида смесей, должны соответствовать требованиям, указанным в табл. 8.3 (СТБ 1033–2004, прил. Ж).

В Беларуси разработаны «Рекомендации по активации минеральных материалов для приготовления асфальтобетонных смесей» (Т.А. Чистова, Я.Н. Ковалев), Активацию минеральных материалов рекомендуется производить при соответствующем технико-экономическом обосновании в случаях, когда другими способами невозможно обеспечить установленные СТБ 1033–2004 показатели свойств асфальтобетонных смесей и асфальтобетона. Для активации минеральных материалов используют активатор, представляющий собой водный раствор поливалентных металлов.

Таблица 8.3

Показатели свойств дробленых песков и песков из отсевов дробления горных пород

Показатель	Нормы для смесей марок							
	I			II		III		
	Горячие, теплые и холодные типов		Пористые и высокопористые	Горячие, теплые и холодные типов		Пористые и высокопористые	Горячие, теплые и холодные типов	
	А, Б, $Б_х$	Г, $Г_х$		А, Б, $Б_х$, В, $В_х$	Г		Б, В	Г
Предел прочности исходной горной породы при сжатии, МПа, не менее	80	100	60	60	80	40	40	60
Массовая доля глинистых примесей, %, не более	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0

Примечание. Для смесей типа Г марок I и II следует использовать дробленые пески и пески из отсевов дробления только из изверженных горных пород.

8.3.4. Минеральный порошок

Минеральный порошок — компонент асфальтобетона, который существенно отличает этот материал от других битумоминеральных материалов. Вместе с битумом он образует *комплексное асфальтовяжущее вещество* (*КАВ*), «склеивающее» частицы минеральных заполнителей в единый структурированный монолит.

Минеральные порошки могут быть *активированными*, получаемыми при помоле карбонатных горных пород с добавкой ПАВ, или *гидрофобизированными* — при помоле минерального сырья с жидкими органическими вяжущими.

Для приготовления смесей следует применять минеральные порошки, отвечающие требованиям ГОСТ 16557–2005.

Традиционно для изготовления минеральных порошков в качестве сырья используют карбонатные горные породы (как правило, известняки и доломиты). Отмечено, что очень опасным является присутствие в этих породах глинистых примесей (оксиды $Al_2O_3 + Fe_2O_3$), в связи с чем их содержание ограничивается:

- для активированных порошков — не более 7 % по массе;
- для неактивированных порошков — не более 1,7 % по массе.

Исследования, проведенные в Белорусском национальном техническом университете (Я.Н. Ковалев, А.В. Бусел), показали, что существуют реальные возможности получать и широко использовать активированные минеральные порошки из кислых минеральных материалов (кварцевых песков) и отходов промышленности (отработанных формовочных смесей — побочного продукта литейного производства).

8.3.5. Поверхностно-активные вещества и модифицирующие добавки

Добавление ***ПАВ*** в асфальтобетонные смеси улучшает сцепление битума с минеральными материалами, повышает водостойкость асфальтобетона, уплотняемость асфальтобетонных смесей.

Применяют ПАВ двух классов: катионные и анионные. К *катионным* ПАВ относятся соли высших алифатических

аминов. Наиболее доступен БП-3 — продукт на основе полиэтиленполиамина и синтетических жирных кислот. В зависимости от петрографического состава каменных материалов в битум вводится 0,5...1,5 % по массе БП-3. Наиболее употребляемые *анионные* ПАВ — смола госсиполовая (хлопковый гудрон), гудрон жировой и др., которые вводят в битум в количестве 3...7 % по массе.

Для улучшения сцепления битума с гранитом и другими кислыми породами используют катионные ПАВ, с известняками — анионные.

Модифицирующие добавки можно условно разделить на три группы: адгезионные, полимерные, активирующие.

Адгезионные присадки повышают сцепление битума с поверхностью минерального материала и обеспечивают соответствие нормативным документам показателей плотного асфальтобетона по коэффициентам морозостойкости после 50 циклов замораживания–оттаивания и водостойкости при длительном водонасыщении в агрессивной среде после 28 сут. без ухудшения предела прочности при сдвиге при температуре 50 °С.

Модифицирующие полимерные добавки, применяемые в дорожных битумах для повышения сдвигоустойчивости и трещиностойкости асфальтобетона, должны соответствовать требованиям нормативных документов. Битумы с полимерными добавками должны соответствовать требованиям нормативных документов на модифицированные битумы.

В настоящее время установлена возможность (Я.Н. Ковалев, С.С. Будниченко) применения в асфальтобетоне торфа как активирующей добавки с целью увеличения прочности адгезионной связи в системе битум — минеральный заполнитель. Суть заключается в том, что поверхность горячих заполнителей (после сушильного барабана), взаимодействуя в смесителе с торфяной добавкой, приводит к ее термической деструкции, а выделенные при этом газообразные продукты активируют поверхности заполнителей и увеличивают их адгезионную активность к битуму.

Для приготовления щебеночно-мастичных смесей в качестве ***стабилизирующей добавки*** следует применять целлюлозные волокна или гранулы на их основе.

Целлюлозные волокна должны иметь структуру нитей, быть однородными и не содержать пучков и скоплений нераздробленного материала.

Целлюлозные волокна и гранулы на их основе не должны содержать парафиновые углеводороды (кроме тех, которые имеются в составе применяемых для производства гранул нефтяных битумов), пластмассы, лаки, смолы.

Свойства целлюлозных волокон и гранул на их основе должны соответствовать требованиям, указанным в табл. 8.4, и контролироваться для каждой партии.

Таблица 8.4

Показатели физико-химических свойств целлюлозных волокон и гранул на их основе

Показатель	Значение показателя	
	Волокно	Гранулы
Влажность, % по массе, не более	5	5
Средняя длина, мм	1,0...1,1	5...7
Средний диаметр, мм	0,045...0,05	5...6
Содержание α-целлюлозы, % по массе, не менее	70	—
Содержание битума нефтяного, % по массе	—	8...14

Примечание. Требования к целлюлозному волокну распространяются и на волокна, входящие в состав гранул.

Европейский опыт свидетельствует, что применение во многих странах ЩМА со стабилизирующей добавкой в виде гранулированных целлюлозных волокон в качестве дорожных покрытий подтвердило свою высокую эффективность. Отмечается повышенная коррозионная стойкость и сдвигоустойчивость данного материала при высоких температурах. В качестве стабилизирующей добавки в настоящее время применяют импортное целлюлозное волокно (TECHNOCEL, ANTROCEL-P) или гранулы на его основе (VIATOP, TOPCEL, ANTROCEL-G). Однако их применение увеличивает стоимость ЩМС, по сравнению с обычной смесью, на 10...15 %.

В БНТУ (Я.Н. Ковалев, С.С. Будниченко) были проведены исследования по поиску стабилизирующей добавки для ЩМА из недифицитного местного сырья. Показано, что для этой

цели вполне пригоден торф. Данная стабилизирующая добавка полностью соответствует требованиям СТБ 1033–2004, а также дает прямой экономический эффект.

8.3.6. Улучшение качества минеральных заполнителей, используемых в асфальтобетонных смесях

Крупные минеральные заполнители (щебень из прочных скальных пород, щебень из дробленого гравия) поставляются камнедробильными заводами и, как правило, соответствуют требованиям стандартов. Однако в некоторых случаях возникает необходимость вносить коррективы, устраняющие отдельные отклонения от нормативных требований. Для этого проводятся:

- промывка загрязненного щебня;
- дробление крупных фракций щебня;
- смешивание мелких песков с высевками для увеличения модуля крупности (укрупнения).

Промывка загрязненного щебня осуществляется путем его перемещения на транспортере из обычного штабеля в другой с дождеванием (рис. 8.3, *а*).

Если щебень состоит из зерен разной прочности, его разделяют (обогащают) по прочности на барабанном классификаторе (рис. 8.3, *б*).

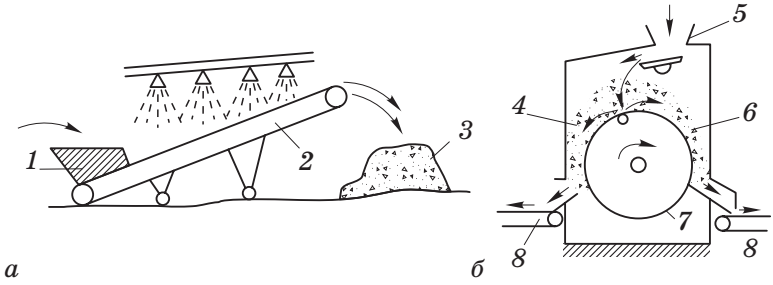


Рис. 8.3. Способы обогащения щебня:
а — промывка на ленточном конвейере (*1* — загрузочный бункер; *2* — конвейер; *3* — промытый щебень); *б* — разделение щебня по прочности зерен на механическом классификаторе (*4* — прочный щебень; *5* — загрузочный люк; *6* — слабый щебень; *7* — стальной барабан; *8* — конвейер)

Исправлять зерновой состав (модуль крупности) песков можно также после их сушки в сушильном барабане путем разгрохотки горячей смеси до ее поступления в смеситель.

Установлено, что сцепление битума с активированной поверхностью минеральных зерен гораздо сильнее, чем с обычной. Поэтому в БНТУ разработан способ трибоактивации песков (Я.Н. Ковалев, С.Е. Кравченко).

Процесс трибоактивации песков состоит из двух операций: трибоэлектризации поверхности зерен песка (сообщения ей электрических зарядов регулируемого значения и знака) и обработки заряженной поверхности определенным типом ПАВ противоположного заряда. Поверхность песков можно «заряжать» как положительными, так и отрицательными электрическими зарядами. Поэтому при обработке трибоэлектризованных поверхностей с отрицательными электрическими зарядами следует применять катионные ПАВ; анионные ПАВ будут наиболее эффективны при обработке поверхностей с положительными электрическими зарядами.

Трибоактивация песков осуществляется в специальной установке (рис. 8.4), позволяющей последовательно проду-

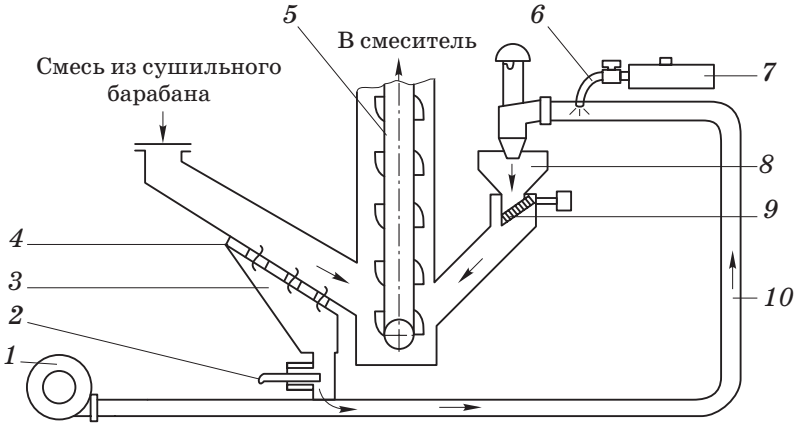


Рис. 8.4. Технологическая линия для получения трибоактивированных песков:
1 — вентилятор; *2* — шиберная задвижка; *3* — приемный бункер песка; *4* — вибрирующая металлическая сетка; *5* — горячий элеватор; *6* — устройство для подачи ПАВ; *7* — емкость для ПАВ; *8* — циклон; *9* — дроссельная заслонка; *10* — трубопровод-активатор

вать песок через трубу-активатор (электризация поверхности) и обрабатывать его дисперсно-распыленным ПАВ в виде аэрозоля.

8.3.7. Улучшение качества битумов, используемых в асфальтобетонных смесях

Улучшение качества битумов — задача нефтеперерабатывающих заводов. Только там можно целенаправленно регулировать групповой состав вязких битумов при надлежащем автоматическом контроле и квалифицированно соблюдать те или иные технологические режимы переработки нефти.

Существует два основных направления методов улучшения качества дорожных битумов: реагентное и нереагентное.

Реагентные методы, предполагающие введение в состав сырья (или готовых товарных битумов) различных добавок (ПАВ, полимеры и т.п.), имеют свою продолжительную историю, апробированы и внесены в нормативные документы (например, СТБ 1220–2000 «Битумы модифицированные дорожные. Технические условия»).

Нереагентные методы — более поздний этап развития технологических приемов улучшения битумов, основой которых являются различные физические эффекты. Нереагентные методы можно подразделить на четыре группы:

- ультразвуковой метод;
- магнитный (электромагнитный) метод;
- механохимический метод;
- электрогидравлический метод.

Ультразвуковой метод. В Харькове в 1980-х г. был разработан метод ультразвуковой активации битума для получения асфальтобетона (В.Н. Зинченко, В.А. Золотарев); изучено влияние длительности ультразвуковой обработки битумов на степень возрастания их адгезионных свойств по отношению к минеральным материалам и показано, что такая обработка повышает адгезионные свойства битума, по сравнению с обычным, на 30...70 %. Это способствует увеличению водо- и морозоустойчивости асфальтобетонов на их основе, а также устойчивости к старению.

Физическая сущность процесса ультразвуковой активации битума заключается в следующем. В результате такой обработки происходит разрыв межмолекулярных связей асфальтеновых комплексов и образование более мелких блоков, отличающихся энергетической активностью, приводящей к усилению адгезионных свойств. Разрушение под действием ультразвука углеводородных оболочек, экранирующих полярные группы асфальтено-смолистых комплексов, также способствует повышению активности битума, реализуемой в процессе взаимодействия с минеральными материалами.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований подтверждены при производственной проверке в условиях АБЗ.

Магнитный (электромагнитный) метод. Исследования, проведенные в России (М.Н. Першин, А.П. Платонов, Е.Н. Баринов и др.), позволили разработать и внедрить эффективную технологию приготовления асфальтобетонных смесей на вспененных (активированных) битумах при воздействии электромагнитных полей.

Особенностью технологического процесса приготовления магнитоактивированных битумов является то, что при прохождении по битумопроводу вяжущее вспенивается, а затем подвергается воздействию переменного магнитного поля. Процесс вспенивания сопровождается резким увеличением суммарной величины поверхности раздела битум—газ, что, в свою очередь, приводит к росту свободной энергии системы. Следовательно, битум по мере вспенивания приобретает все большую свободную энергию, которая, в частности, проявляется в повышении его смачивающей и адгезионной способностей.

Вяжущее в таком состоянии особенно активно взаимодействует с наиболее тонкой частью минерального материала. Поэтому вспененные вяжущие представляют интерес для обработки плотных смесей с большим содержанием минерального порошка, а также некондиционных минеральных материалов с избытком тонкодисперсных (загрязняющих) фракций.

При применении вспененных вяжущих уменьшается расход битума (до 10 % массы вяжущего) и время перемешива-

ния материалов (на 20...25 %), что позволяет рассматривать этот способ как материало- и энергосберегающую технологию приготовления асфальтобетонных и битумоминеральных смесей.

Этот способ дает реальную возможность существенно уменьшить температуру нагрева вяжущего и минеральных материалов, что обеспечивает не только сокращение расхода топлива, но и увеличение продолжительности межремонтных сроков эксплуатации дорог с асфальтобетонными покрытиями. За счет снижения рабочей температуры нагреваемых битумов уменьшаются процессы их старения. При нагреве вспененного битума до 130 °С (обычно битум нагревается до 140...160 °С) продолжительность межремонтных сроков может возрасти на 4–5 лет.

Еще одним важным достоинством использования битумов в пенном состоянии является то, что эта технология может быть внедрена практически на любых АБЗ без существенного переоборудования.

Примерно такой же эффект достигается и при применении аппаратов с переменным электромагнитным полем (АВС).

Механохимический метод. Это направление отличается от предыдущих методов прежде всего своей механоактивационной направленностью улучшения битумов при их изготовлении на НПЗ.

Нереагентное повышение адгезии битумов заключается в обеспечении максимально возможного перекрытия электронных орбиталей молекул активированного битума и минерального материала.

Эффект достигается (при сниженном температурном режиме) за счет интенсивной механоактивации битума при высоких градиентах скорости его движения между слоями, что обеспечивает разрыв слабых связей с высвобождением энергии образующихся свободных радикалов.

Практически реализация механохимического метода активации битумов наиболее эффективно может быть осуществлена с помощью дезинтегратора Хинта или по методу Волгоградского государственного строительно-архитектурного университета (С.И. Романов, С.А. Пронин и др.).

Электрогидравлический метод. Этот метод относится к перспективным нанотехнологиям, т.е.технологиям отдаленного будущего с внедрением только в составе НПЗ.

Исследования, проведенные в Белорусском национальном техническом университете (Я.Н. Ковалев), показали, что электрогидравлическая обработка битума ведет к существенному изменению его группового состава и, как следствие, к изменению физико-механических свойств (в частности, растяжимость битума можно изменять почти в два раза по сравнению с исходным). Это открывает перспективы для разработки новых технологических схем получения битума с заданными свойствами, а также комплексных органических вяжущих веществ.

Несмотря на положительные результаты экспериментов и их теоретическое обоснование, для широкой производственной апробации метода пока нет производственной базы: отсутствует надлежащее заводское оборудование и технологический регламент.

8.4. Конструкции дорожных одежд с асфальтобетонными покрытиями

Дорожная одежда во всех странах выглядит идентично — это конструкция, состоящая из нескольких слоев: покрытия, основания, писчаного подстилающего слоя.

Покрытие состоит из одного или двух слоев асфальтобетона: верхний слой из плотного мелкозернистого асфальтобетона (горячего, теплого или холодного), нижний слой — из крупнозернистого пористого горячего или теплого асфальтобетона.

Основание состоит одного или двух слоев: верхний слой из связных материалов, нижний — из дискретных. *Связные материалы* обычно представлены высокопористым асфальтобетоном, битумоминеральными материалами либо каменными материалами или грунтами, укрепленными вяжущими. *Дискретные материалы* — щебень, гравий, отходы промышленности.

Если материалы для покрытий во всех странах идентифицированы (одинаковы), то для слоев оснований часто используются местные материалы, отличающиеся большим разнообразием. Поэтому прочность всей дорожной одежды зависит не только от свойств материалов в слоях, но и от сочетания слоев и их толщины.

Обычно возможные и рекомендуемые конструкции дорожных одежд представлены в альбомах типовых конструкций, являющихся ориентиром для расчетов в конкретных условиях.

Анализ воздействия транспортных нагрузок и погодно-климатических факторов на дорожную одежду сформировал комплекс показателей, которым должна соответствовать ее прочность и надежность:

- сопротивление растяжению при изгибе от транспортных нагрузок;
- сопротивление осевому растяжению при морозных деформациях;
- сопротивление сдвигу от касательных комплексных нагрузок (особенно при высоких температурах, когда появление пластических деформаций в виде волн и колей наиболее вероятно).

При выборе материалов для устройства слоев дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием необходимо учитывать следующие положения:

1) **покрытие и верхние слои основания должны соответствовать** проектным нагрузкам и быть водо- и морозостойкими;

2) **вид, марку и тип асфальтобетона для покрытия назначают** в соответствии с СТБ 1033–2004 «Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия» и ТКП 45-3.03-19 «Автомобильные дороги. Нормы проектирования».

Основная задача при конструировании асфальтобетонного покрытия — уменьшить толщину верхнего (наиболее дорогого) слоя и сократить число слоев.

На сроки службы асфальтобетонных покрытий влияют не только его прочностные свойства, но и теплофизическая со-

вместимость материалов покрытия и основания. Не должно быть резкого различия в показателях теплоемкости, теплопроводности и температурного расширения материалов покрытия и основания, в противном случае нельзя гарантировать высокую надежность их совместной работы при понижении температуры, когда возникает опасность развития морозных трещин в покрытии.

Коэффициенты линейного температурного расширения асфальтобетонного покрытия и основания из цементного бетона или материала, укрепленного минеральными вяжущими, отличаются друг от друга почти в 10 раз. Поэтому на покрытии в такой конструкции трещины практически неизбежны.

Опыт показал, что асфальтобетонные покрытия на битумоминеральном основании почти никогда не образуют трещин, поскольку их температурные деформации одинаковы.

8.5. Структура асфальтобетона

Структура — одно из фундаментальных понятий в науке и технике. Это совокупность устойчивых связей компонентов объекта, обеспечивающих его целостность в различных внешних и внутренних изменениях.

Композиционные материалы (все бетоны) представляют собой уплотненные комплексы, состоящие из твердых включений, связанных квазижидкими вяжущими веществами («клеем») в единый структурированный монолит. Таким образом, изначально предполагается наличие в них четкого раздела фаз.

Исходя из этого можно сформулировать понятие «структура асфальтобетона».

Структура асфальтобетона (внутреннее строение) — это пространственное расположение в единице объема кристаллических минеральных частиц различной формы и степени дисперсности, связанных энергетически между собой аморфным вяжущим веществом (рис. 8.5).

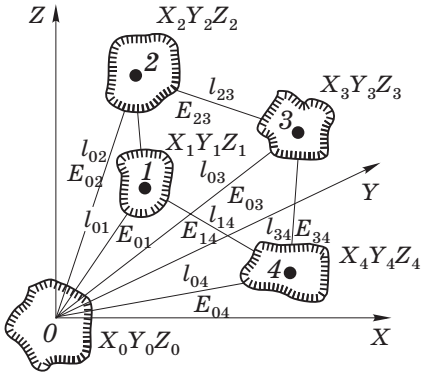


Рис. 8.5. Схематическая модель структуры асфальтобетона: l_i — среднестатистические расстояния между частицами, определяющие степень контактности зерен минерального состава; E_i — энергетические связи на границе раздела фаз в системе битум — минеральный материал

При этом вид структуры асфальтобетона определяется структурой минерального остова, битума (или асфальтовяжущего) и контактного слоя на границе раздела фаз (рис. 8.6).

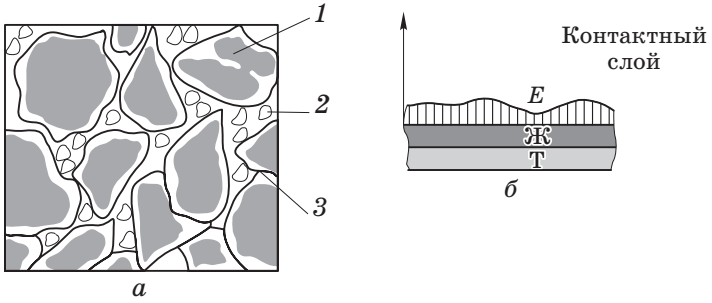


Рис. 8.6. Структура асфальтобетона каркасного типа: *а* — схема структуры минерального остова в единице объема асфальтобетона; *б* — схема контакта битума (квазижидкость) с минеральным заполнителем (щебень, гравий, песок) на границе раздела фаз; *1* — крупный заполнитель; *2* — мелкий заполнитель (песок); *3* — контактный слой (структурированная часть битума асфальтовяжущего вещества); *E* — энергетическая связь на границе раздела фаз; Ж — квазижидкое тело (битум); Т — твердое тело (щебень, гравий, песок)

8.5.1. Структура минерального остова в асфальтобетоне

Плотность и пористость минерального остова зависят от количественных соотношений щебня, песка и минерального порошка (табл. 8.5).

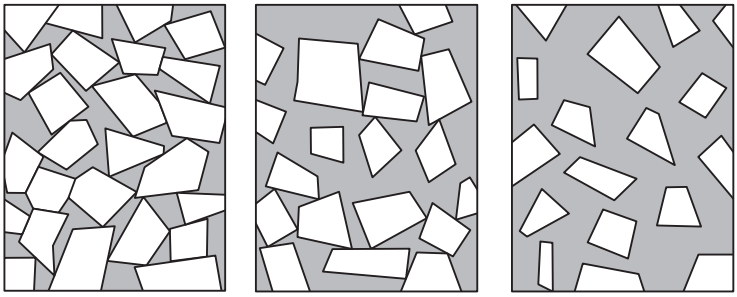
Таблица 8.5

Зависимость пористости минерального остова и асфальтобетона от количественного соотношения крупного заполнителя и минерального порошка

Количественное соотношение компонентов, %		Пористость минерального остова, %	Остаточная пористость асфальтобетона при оптимальном содержании битума, %
щебень (гравий)	минеральный порошок		
65...50	4...10	15...17	2...3,5
50...35	6...12	17...19	2...5
35...20	8...14	19...22	3...7

Структура асфальтобетона может быть каркасной, полукаркасной и бескаркасной (рис. 8.7).

Каркасным называется минеральный остов, состоящий из плотно упакованного щебня, пустоты которого заполнены асфальтовым раствором. Объем асфальтового раствора не пре-



а *б* *в*

Рис. 8.7. Схема структуры асфальтобетона стандартизованных составов:
а — каркасный минеральный остов; *б* — полукаркасный; *в* — бескаркасный (песчаный асфальтобетон)

вышает объема пустот в щебне, а самые крупные зерна песка не больше размера пустот каркаса и не раздвигают его зерна (рис. 8.7, *а*).

При каркасной структуре минерального остова объем щебня в уплотненном асфальтобетоне равен объему самого асфальтобетона, а зерна заполняющей смеси мельче 0,63 мм. Каркас из щебня образуется при его содержании в смеси не менее 50...65 %. Наиболее характерным представителем каркасных асфальтобетонов является *щебеночно-мастичный* (более 80 % щебня).

Достоинство каркасного минерального остова состоит в его высоких сдвиговых характеристиках (по данным Н.В. Горелышева) (рис. 8.8).

Полукаркасным называется минеральный остов, зерна щебня в котором частично раздвинуты повышенным объемом асфальтового раствора (рис. 8.7, *б*).

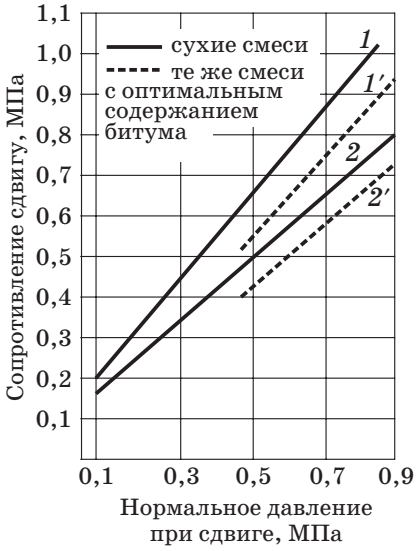


Рис. 8.8. Влияние количества щебня на сопротивление сдвигу «сухих» минеральных смесей и асфальтобетона (по Н.В. Горелышеву):

1, *1′* — смеси с 65 % щебня;
2, *2′* — смеси с 20 % щебня

Бескаркасным называется минеральный остов, в котором зерна щебня раздвинуты объемом растворной смеси и как бы плавают в пластичной растворной части асфальтобетона (рис. 8.7, *в*).

Таким образом, изменяя гранулометрический состав смеси и структуру минерального остова, можно управлять свойствами асфальтобетона, изменяя их в широких пределах.

Структура минерального остова зависит от того, в каких количествах смешиваются фракции разной крупности и насколько различаются крупности этих фракций.

Укоренившееся представление о том, что зерна мелкой фракции заполняют пустоты крупной фракции, требует уточнения, так как в действительности заполнение пор крупнозернистой фракции более мелкими фракциями без раздвижки крупных зерен возможно только в том случае, когда размер зерен заполняющей фракции меньше размера пустот заполняемой фракции. По данным Н.В. Горелышева, различие крупности заполняющей и заполняемой фракций должно быть не меньше чем в 16 раз, иначе мелкие зерна раздвинут крупные своим размером.

8.5.2. Структура битума в асфальтобетоне

Немаловажную роль в структуре асфальтобетона играют структура битума как вещества в межзерновом пространстве, соотношение свободного и адсорбированного битума, а также сам характер строения пленок битума на поверхности минеральных зерен (рис. 8.9).

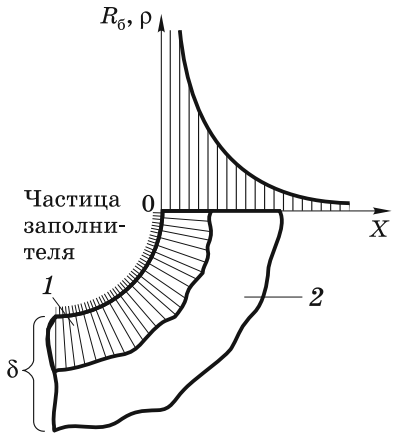


Рис. 8.9. Структура битума при взаимодействии с минеральным материалом (в контактном слое)
1 — структурированный битум; *2* — объемный битум (в межзерновом пространстве в составе асфальтовяжущего вещества); $R_б$ — прочность битумной пленки; ρ — плотность битума; X — расстояние от поверхности минерального материала; δ — общая толщина битумной пленки, мкм

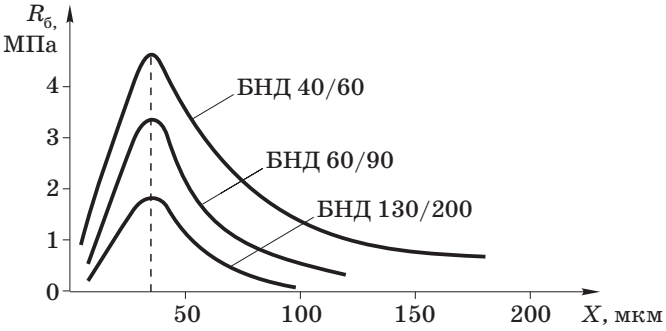


Рис. 8.10. Изменение прочности битумной пленки ($R_б$) в зависимости от расстояния от поверхности минерального материала для различных марок битумов

График изменения прочности пленок битума БНД от расстояния от поверхности минерального материала в асфальтобетонной смеси показана на рис. 8.10.

8.5.3. Распределение битума в асфальтобетоне и его взаимодействие с минеральными материалами

Процесс приготовления асфальтобетонной смеси предусматривает равномерное распределение вяжущего и полное покрытие каждого минерального зерна пленкой битума, что значительно влияет на прочность, устойчивость и долговечность покрытия.

При неполном покрытии минеральных зерен битумной пленкой (из-за недостатка битума в смеси) асфальтобетон интенсивно разрушается во влажной среде вследствие того, что вода проникает через открытые места на зернах под битумную пленку и вытесняет (отслаивает) ее с минеральной поверхности заполнителей.

Избыток битума также нежелателен: его неоптимальное количество ухудшает распределение вяжущего в объеме смеси за счет миграции части битума при уплотнении смеси из зон повышенного напряжения.

Поэтому важно знать поверхность минеральных компонентов смеси, которая должна покрываться битумной пленкой.

Суммарная поверхность (ΣS) складывается из поверхностей минерального порошка ($S_{м.п}$), песка ($S_{п}$) и щебня ($S_{щ}$):

$$\Sigma S = S_{м.п} + S_{п} + S_{щ}. \quad (8.1)$$

Для практических целей удельную площадь поверхности минеральной части асфальтобетонной смеси определяют расчетным методом, разработанным И.В. Королевым. По этому методу удельная площадь поверхности минеральной части асфальтобетонной смеси

$$S_{см} = \frac{1}{100}\sum_{i-1}^{m} S_i P_i, \quad (8.2)$$

где S_i — удельная площадь поверхности фракции i, м^2/кг; P_i — содержание фракций i, %; m — число фракций.

Удельная площадь поверхности фракции i

$$S_i = \frac{K}{d_{ср}\rho_м}, \quad (8.3)$$

где K — коэффициент формы; $d_{ср}$ — средний диаметр фракции i, м; $\rho_м$ — средняя плотность материала, кг/ м^3.

Для гравия и песка, зерна которых округлены, но не имеют форму шара, принимается $K = 8$; для дробленого гравия $K = 10$; для щебня из гравия $K = 12$; для игловатых зерен, не достигших формы тетраэдра, $I = 14$ (к этой группе относятся щебень из гранита, диорита, андезита, плотного известняка и др.).

Расчеты показали, что удельная поверхность минеральной части асфальтобетона возрастает от типа А до типа Д почти в три раза. Так, для мелкозернистой смеси типа А удельная площадь поверхности составляет 29 м^2/кг, а для песчаной типа Д — 79,28 м^2/кг.

Распределение битума в асфальтобетоне взаимосвязано с удельной площадью поверхности минеральных зерен следующей зависимостью:

$$\delta = \frac{\alpha Б}{S\rho_б}, \quad (8.4)$$

где δ — толщина битумной пленки на минеральных зернах, мкм; α — переводной коэффициент; Б — количество битума,

% от массы минеральной части; S — удельная площадь поверхности зерен минерального материала, м^2/кг; $\rho_б$ — плотность битума, кг/м^3.

Подставляя в формулу (8.4) значение S из формулы (8.3), получаем

$$\delta = \frac{d_{ср}\alpha Б\rho_м}{K\rho_б}. \quad (8.5)$$

Из полученной зависимости следует, что толщина пленки прямо пропорциональна количеству битума и величине зерен в смеси.

Для практических целей удобно определять толщину пленки битума не на зернах данного размера, а для узких фракций зерен (m):

$$\delta_m = \frac{10}{S_m P_m \rho_б}\left(Б - \frac{1}{10}\rho_б \sum_{i=1}^{m-1} P_i S_i \delta_i\right), \quad (8.6)$$

где δ_m — толщина битумной пленки на частицах фракции m, мкм; S_m — удельная площадь поверхности фракции m, м^2/кг; P_m — содержание фракции m, часть от целого; Б — оптимальное количество битума в смеси, %; P_i — содержание фракции i, часть от целого; δ_i — толщина битумной пленки на частицах фракции i, мкм.

По приведенной формуле определяют толщину битумной пленки на минеральных зернах в смеси оптимальной гранулометрии, при которой формируется асфальтобетон с наибольшей прочностью и плотностью.

Толщина битумной пленки на минеральных зернах взаимосвязана также с вязкостью бетона: от марки БНД 90/130 до БНД 200/300 толщина пленки на зернах уменьшается на 10 %.

Взаимодействие битума с минеральными частицами в асфальтобетоне включает следующие два основных процесса: физический и химический (хемосорбционный).

Физическое взаимодействие битума с минеральными материалами обусловлено способностью вяжущего адсорбироваться на поверхности минеральных зерен и фильтроваться

внутрь их. В результате на поверхности пористых минеральных материалов образуются слои повышенной концентрации высокомолекулярных компонентов битума (смол и асфальтенов), поскольку внутрь зерен по капиллярам фильтруются только легкие масла битума. Таким образом, поверхностный слой битума на таких зернах обогащен асфальтено-смолистой частью. Вследствие этого битумные пленки становятся более жесткими и менее эластичными, что ускоряет переход асфальтобетона в хрупко-жесткое состояние, способствующее снижению морозостойкости и образованию трещин на покрытии.

Химическое взаимодействие битума с минеральными компонентами характерно при контактном взаимодействии минеральных материалов из карбонатных горных пород (у которых поверхностный заряд положительный) с битумами, содержащими анионактивные ПАВ (асфальтогеновые, нафтеновые кислоты и т.п.), имеющими отрицательный электрический заряд. Такие контакты приводят к образованию на границе раздела фаз новых прочных химических соединений, способствующих образованию устойчивых хемосорбционных адгезионных контактов.

Между известняком и битумом, содержащим, например, асфальтогеновые кислоты, происходит реакция с образованием кальциевых мыл:

$$CaCO_3^+ + 2RCOOH^- = Ca(RCOO)_2 + H_2O + CO_2,$$

где RCOOH — асфальтогеновая кислота; $Ca(RCOO)_2$ — кальциевое мыло, которое нерастворимо в воде.

В этом случае битумные пленки, образованные на поверхности минеральных частиц, становятся полностью ***гидрофобными***.

При объединении битума с кислыми минеральными материалами, богатыми кремнеземом (SiO_2), частицы которого имеют на поверхности отрицательный электрический заряд, хемосорбционные адгезионно-устойчивые соединения не образуются. В этом случае прочность сцепления битумной пленки и поверхности кислых материалов пониженная, особенно в

присутствии воды, так как адгезионный контакт обусловлен только слабыми силами физической адсорбции. Для усиления адгезии битума к кислым минеральным материалам (гранитный щебень, кварцевые пески) в смесь вводят катионактивные ПАВ. Только тогда возможно образование прочных химических соединений.

Устойчивая структура асфальтобетона определяется энергетическими связями на поверхности раздела его твердых и жидких компонентов. Связи между компонентами в асфальтобетонах (по П.А. Ребиндеру) классифицируются по типу образующихся структур: коагуляционной, конденсационной и кристаллизационной.

При положительных температурах для пластичных асфальтобетонов наиболее типична *коагуляционная* структура, для жестких — *конденсационная*. В области достаточно низких отрицательных температур почти для всех асфальтобетонов характерна *кристаллизационная* или *конденсационно-кристаллизационная* структура. Основным признаком таких структур является реологическое состояние асфальтовяжущего вещества в контактном слое между заполнителями асфальтобетона.

В заключение можно отметить, что выявление структурных особенностей асфальтобетона имеет большое практическое значение: зная эффективный метод регулирования структуры, можно существенно улучшать свойства этого материала. Причем особое значение это приобретает при использовании некондиционных компонентов в асфальтобетоне.

8.6. Свойства асфальтобетона

8.6.1. Общие положения

Свойства асфальтобетонных смесей (АБС) и асфальтобетона (АБ) подразделяются на три основные группы:

- технологические;
- физико-химические;
- эксплуатационные.

Такая общая классификация свойств АБС и АБ основана на необходимости оценки их качества на трех различных стадиях анализа объекта с четко разграничиваемыми целями.

I стадия — оценка технологических свойств АБС с точки зрения удобства ее распределения тонким слоем асфальтоукладчиком и уплотнения катками (или другими механизмами). На этой лабораторной стадии должен быть получен ответ на вопрос, насколько технологично (экономно) работать с данной АБС при строительстве асфальтобетонных покрытий и оснований.

II стадия — определение в лабораторных условиях ряда свойств АБ, косвенно оценивающих его потенциальные способности сопротивляться механическим нагрузкам и погодно-климатическим факторам. Эти испытания являются условными. Они призваны дать ответ на вопрос, насколько свойства проектируемого состава АБ отвечают установленным в данное время нормативным требованиям (СТБ, ГОСТ).

III стадия — оценка интегральных свойств АБ, связанных с необходимостью прогноза долговечности данного материала с заданной надежностью при конкретных эксплуатационных воздействиях на дорожное покрытие или основание. Определение таких свойств относится к сфере научных исследований и призвано дать ответ на вопрос, какие методы испытаний должны быть разработаны для обеспечения долговременной работы асфальтобетонных покрытий с заданными эксплуатационными свойствами (ровность, прочностные показатели, шероховатость и т.п.).

Исходя из изложенных принципов целевого определения свойств асфальтобетона была предложена их общая классификация (рис. 8.11).

Асфальтобетон в конструкции в зависимости от температуры и условий деформирования может находиться в следующих структурных состояниях:

- *упругохрупкое* — минеральный остов строго фиксирован застеклованными прослойками битума. В этом случае асфальтобетон по свойствам приближается к цементобетону и дру-

Рис. 8.11. Классификация свойств асфальтобетона (по Ковалеву Я.Н.)

гим искусственным материалам с кристаллизационными связями;

- *упругопластичное* — зерна минерального остова соединены прослойками битума, которые при напряжениях, не превышающих предел текучести, проявляют упругие и эластические свойства, а при больших напряжениях — упруговязкие свойства;
- *вязкопластичное* — зерна минерального остова соединены полужидкими прослойками битума и даже небольшое напряжение приводит к деформированию материала.

Указанные структурные состояния АБ в той или иной степени учитываются при проектировании его составов. Объяснение механизма сопротивления асфальтобетона транспортным нагрузкам и погодно-климатическим факторам способствует обеспечению требуемого качества дорожных асфальтобетонных покрытий.

8.6.2. Технологические свойства асфальтобетона

К технологическим свойствам асфальтобетона, определяемым на I стадии, относят удобоукладываемость, уплотняемость и однородность. Они используются для оценки ровности распределения смеси тонким слоем асфальтоукладчиком и уплотнения уложенной смеси катками.

Удобоукладываемость. Смеси с большим содержанием минерального порошка (литой асфальтобетон) легко укладываются тонким слоем, не требуют механического уплотнения.

Удобоукладываемы также многощебеночные смеси (тип А, ЩМА): в них асфальтовяжущее вещество малоконцентрировано, поэтому их вязкость не очень высокая.

Стандартизированных приборов для определения этого свойства нет, поэтому оценку удобоукладываемости проводят визуально.

Уплотняемость смеси характеризуется работой, затраченной на ее уплотнение до заданной плотности.

Представляется возможной следующая формулировка этого свойства: предельно возможной плотностью смеси следует

считать такую плотность, при которой дальнейшее ее повышение невозможно без дробимости щебня.

Среди различных методов определения уплотняемости наиболее приемлемым является, предложенный И.В. Королевым метод, в котором за показатель степени уплотнения принято число нагружений, необходимое для получения асфальтобетонного образца заданной плотности. Этим способом можно определять: требуемую температуру смеси для ее оптимального уплотнения, ее граничные пределы, когда эффект уплотнения резко падает, а также требуемое число проходов катков с разной массой.

Из-за отсутствия приемлемого лабораторного метода определения уплотняемости это свойство на практике оценивают пробным уплотнением, т.е. определением числа проходов катков по одному следу, при котором дальнейшее повышение плотности прекращается. В настоящее время степень уплотнения асфальтобетона оценивается по коэффициенту уплотнения, который нормирован для его вида по пористости.

Однородность смесей. Качество АБС оценивается путем статистической обработки значений показателей свойств горячей смеси (по показателям прочности сформованных образцов асфальтобетона).

8.6.3. Физико-механические свойства

В настоящее время эти свойства являются определяющими при проектировании состава асфальтобетона (АБ), текущем и приемочном контроле АБС на асфальтобетонных заводах.

В Беларуси АБС должны приготавливаться в соответствии с требованиями СТБ 1033–2004 «Смеси асфальтобетонные дорожные. Технические условия», а определение свойств должно проводиться в соответствии с СТБ 1115–2004 «Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытаний».

Чтобы осознанно применять указанные нормативы, необходимо кратко рассмотреть значение основных свойств асфальтобетона, их физику и механику и только затем ознакомиться

с существующими стандартизированными показателями этих свойств с указанием нормативных требований.

Асфальтобетон в дорожном покрытии, кроме механических воздействий автомобилей, подвергается воздействию атмосферных и талых вод (частью в виде солевых растворов, образующихся при рассыпке на покрытиях солей NaCl и $CaCl_2$).

Вода проникает в поры асфальтобетона и ослабляет взаимную адгезионную связь минеральных материалов с пленкой вяжущего. Поэтому большое значение имеет знание плотности и пористости АБ, от величины которых зависят все водные свойства асфальтобетона и его морозостойкость.

На деформируемость и прочность АБ оказывает существенное влияние температурный режим его работы в покрытии. Поэтому оценку его структурно-механических свойств производят при следующих температурах:

- максимальной для данной местности температуре асфальтобетонного покрытия, когда когезия вяжущего минимальна;
- минимальной температуре, когда прочность покрытия достаточна, так как когезия вяжущего достигает наибольших значений, но при нарушении однородности структуры, особенно при повторных замораживаниях, минимальные удлинения способствуют образованию трещин, а в отдельных случаях и выкрашиванию покрытия;
- некоторых средних температурах, когда наиболее вероятно водонасыщение асфальтобетона и снижение прилипания вяжущего к минеральным материалам, что может привести к быстрому износу и хрупкому разрушению покрытия.

Под механической нагрузкой асфальтобетон проявляет комплекс сложных свойств: упругость, пластичность, ползучесть, релаксацию напряжений, изменение прочности в зависимости от скорости деформирования, накопление деформации при многократных приложениях нагрузки и т.п. В зависимости от проявления тех или иных свойств к асфальтобетону применимы законы теории упругости или теории пластичности.

Свойства асфальтобетона обычно начинают рассматривать с ведущего показателя механических свойств материала — ***прочности*** — свойства асфальтобетона сопротивляться разрушению под действием механических напряжений. Для асфальтобетона, как для термопластичного материала, различают два вида потери прочности:

- в упругой стадии — приводит к разрушению покрытий;
- в пластической стадии — приводит к возникновению деформаций, нарушающих нормальную эксплуатацию конструкции (увеличивается неровность).

Особенностью разрушения асфальтобетона (по сравнению с цементобетоном и другими подобными материалами) является резко выраженная зависимость прочности от времени действия нагрузки и температуры.

Разрушение асфальтобетона под действием приложенного напряжения представляет собой развивающийся во времени процесс. Чем больше значение действующих напряжений, тем быстрее протекает процесс разрушения. Таким образом, механические свойства асфальтобетона характеризуются двумя показателями: *разрушающим напряжением* и *значением длительной прочности* (время, в течение которого асфальтобетон выдерживает заданное напряжение без разрушения).

Зависимость значений разрушающего напряжения от длительности пребывания материала в напряженном состоянии обусловлена процессом *усталости*. Усталость характеризует постепенное снижение работоспособности асфальтобетона при длительно действующих или многократно повторяющихся нагрузках. Усталость проявляется в снижении долговечности материала при многократных циклически действующих нагрузках. Ее характеризуют числом циклов, которые выдерживает асфальтобетон до разрушения.

Основным требованием, которому должен удовлетворять асфальтобетон, работающий в условиях повышенных положительных температур, является его ***сдвигоустойчивость (прочность при сдвиге)***, которая может быть охарактеризована видоизмененным уравнением Кулона:

$$\tau = P \operatorname{tg} \varphi_{аб} + \sum_{б}, \qquad (8.7)$$

где τ — прочность асфальтобетона при сдвиге, МПа; P — удельная нормальная нагрузка при сдвиге, МПа; $\varphi_{аб}$ — угол внутреннего трения асфальтобетона с учетом смазывающего действия битума; $\Sigma_б$ — сцепление в асфальтобетоне, зависящее от количества битума в нем, МПа.

Из уравнения (8.7) видно, что заданная прочность при сдвиге τ может быть получена при различных значениях факторов, определяющих прочность и зависящих в одном случае от свойств минерального остова, а в другом — от сил сцепления, обусловливаемых свойствами битума. При больших значениях угла внутреннего трения минерального остова заданную прочность на сдвиг можно достичь при относительно небольшом сцеплении, обусловливаемом невысокой вязкостью битума. Но свойства минерального материала в диапазоне эксплуатационных температур практически не меняются, в то время как свойства битума сильно зависят от температуры. Поэтому асфальтобетон с высокими значениями угла внутреннего трения всегда будет обладать прочностью на сдвиг при высоких температурах и большой теплостойкостью.

Наиболее важен показатель прочности на сжатие при 50 °С, косвенно характеризующий сдвигоустойчивость асфальтобетонного покрытия под нагрузкой в летнее время.

Показатель, характеризующий пластичность асфальтобетона при положительных температурах, когда возможно появление пластических деформаций покрытий (волны, колеи), определяется расчетным путем с использованием показателя пластичности (K) на основе определения прочностных показателей, получаемых с разной скоростью деформирования:

$$K = \frac{\lg R_1 / R_2}{\lg \upsilon_1 / \upsilon_2}, \qquad (8.8)$$

где R_1 и R_2 — пределы прочности при скоростях υ_1 и υ_2, МПа; υ_1 и υ_2 — скорости деформирования (3 и 30 мм/мин).

Асфальтобетон считают пластичным при 50 °С, если $K > 0{,}25$, и непластичным, если $K \le 1{,}0$.

Асфальтобетон с малым содержанием щебня не может быть сдвигоустойчивым даже при очень большой его прочности.

Прочность асфальтобетона при растяжении определяют непосредственным растяжением специально приготовленного и закрепленного образца или более простым «бразильским» методом, не требующим специального приготовления образцов сложной формы (цилиндрический образец асфальтобетона диаметром D и высотой H подвергают сжатию по образующей). Прочность при растяжении по этому методу

$$R_{\text{р}} = \alpha \frac{P}{DH}, \qquad (8.9)$$

где α — коэффициент (для асфальтобетона как пластичного тела $\alpha = 1$, для хрупких тел $\alpha = 0{,}63$); P — разрушающее усилие; D и H — диаметр и высота образца, см.

С понижением температуры происходит приращение прочности асфальтобетона (рис. 8.12). Участок стабилизации прочности асфальтобетона характеризует переход битумной пленки в хрупкое состояние. Экстремальная точка на графике может быть названа температурой хрупкости данного асфальтобетона. В асфальтобетоне на битуме марки БНД 60/90 участок стабилизации прочности при растяжении достигается при −10 °С, а в асфальтобетоне на битуме БНД 130/200 — при −20 °С.

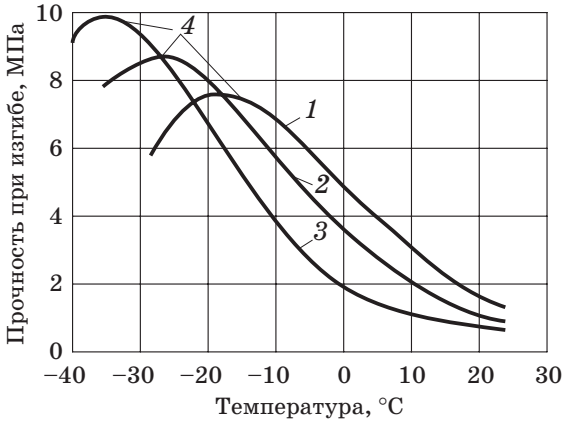


Рис. 8.12. Зависимость прочности на изгиб асфальтобетона от температуры испытаний:
1 — битум БНД 60/90; *2* — БНД 130/200; *3* — БНД 200/300; *4* — условная температура хрупкости асфальтобетона (точка перегиба кривой)

Основным критерием прочности асфальтобетона при отрицательных температурах являются его ***деформативные свойства***, характеризующие устойчивость против образования трещин. При охлаждении объем асфальтобетона сокращается, в покрытии возникают растягивающие напряжения, которые до известной степени могут компенсироваться его ***пластичностью***. Для предотвращения образования трещин необходимо, чтобы асфальтобетон обладал способностью деформироваться под действием растягивающих напряжений без нарушения сплошности. Для оценки его пластичности обычно используют предельную относительную деформацию в момент разрушения. Если деформирование чисто упругое, то критическая относительная деформация не превышает 0,001. По мере повышения температуры критическое относительное удлинение увеличивается.

Деформативность асфальтобетона оценивают по относительной деформации асфальтобетонных образцов при испытании на изгиб или растяжение. Покрытие будет устойчивым против образования трещин, если асфальтобетон обладает относительным удлинением при 0 °С не менее 0,004...0,008, а при −20 °С — не менее 0,001...0,002 (при скорости деформации, близкой к 5...10 мм/мин).

8.6.4. Реологические свойства асфальтобетона

Показатели прочности асфальтобетона не позволяют полностью характеризовать работу материала в покрытии, так как при нагружении в нем возникают не только обратимые, но и необратимые деформации, величина которых связана с уровнем напряжения, временем действия напряжения и скоростью деформации.

Изучением поведения материалов под действием приложенных нагрузок во времени занимается *реология* — раздел механики, тесно примыкающий к физике и охватывающий вопросы деформирования разнообразных материалов (от твердых тел до жидкостей).

Существуют различные подходы к изучению асфальтобетона: теоретические преследуют цель разработки математической модели, описывающей поведение материала; практи-

ческие объясняют поведение материала при деформировании исходя из особенностей его структуры и состава. Эти подходы позволяют определять упругость, вязкость, пластичность материала, а также установить соотношение между ними.

При эксплуатации асфальтобетонного покрытия могут быть следующие режимы нагружения:

- постоянная нагрузка;
- равномерно нарастающая нагрузка;
- деформирование с постоянной скоростью.

Определение изменения свойств асфальтобетона за длительный период производят испытанием на ползучесть.

Ползучесть — процесс нарастания пластической деформации асфальтобетона при постоянной статической нагрузке (на стоянках транспорта) или постепенного накопления такой деформации при приложении кратковременных динамических транспортных нагрузок.

Ползучесть асфальтобетона оценивается путем определения роста деформации образца асфальтобетона, увеличивающейся во времени. Ползучесть зависит от величины нагрузки и температуры (рис. 8.13).

На дорожных покрытиях ползучесть проявляется в виде образующихся волн, наплывов, колеи (особенно при прохо-

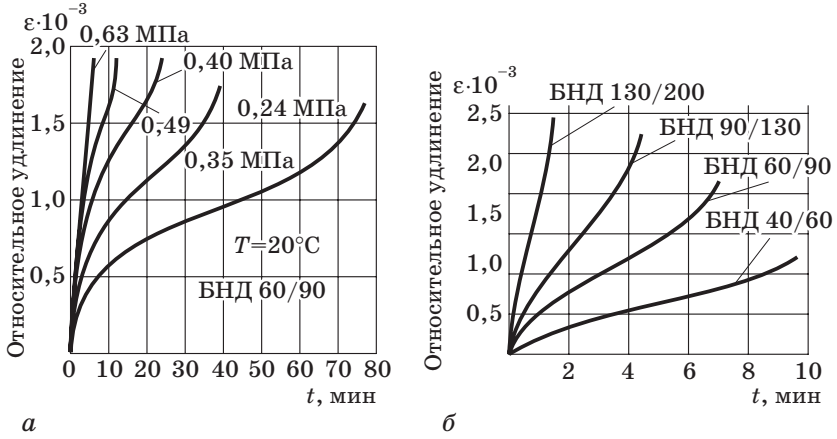


Рис. 8.13. Графики ползучести асфальтобетона:
а — при разных нагрузках; *б* — при битумах разной вязкости

де тяжеловесных автомобилей, следующих «след в след»). Ползучесть проявляется при любом виде нагружения: растяжении, изгибе, сжатии.

Физика процесса накопления остаточных пластических деформаций видна из рис. 2.3 (см. с. 35).

В расчетах дорожных одежд нежесткого типа применяют два показателя прочности асфальтобетона: статический и динамический модуль упругости.

Статический модуль упругости асфальтобетона характеризует воздействие на него автомобиля на стоянке, остановке и перекрестках (табл. 8.6).

Таблица 8.6

Модуль упругости и прочность асфальтобетона при растяжении при изгибе

Материал	Марка битума	Модуль упругости E, МПа	Среднее сопротивление растяжению при изгибе, МПа
Плотный асфальтобетон I и II марок	БНД 40/60	6000	3,2
	БНД 60/90	4500	2,8
	БНД 90/130	3600	2,4
	БНД 130/200	2600	2,0
	БНД 200/300	2000	1,8
	СГ 130/200	1500	1,6

Его определяют при приложении единичной нагрузки в середине пролета образца-балочки:

$$E = \frac{Pl^3}{48fI}, \qquad (8.10)$$

где P — вертикальная нагрузка (принимают 0,2...0,3 от разрушающей нагрузки); l — расчетный пролет балочки (0,14 м); f — упругий прогиб балочки; I — момент инерции сечения образца ($I = bh^3/12$; b и h — ширина и высота балочки).

Значение ***динамического (кратковременного) модуля упругости*** соответствует режиму воздействия подвижных нагрузок на асфальтобетонное покрытие. Как видно из табл. 8.7, значение кратковременного модуля упругости понижается с повышением температуры.

Таблица 8.7

Зависимость кратковременного модуля упругости асфальтобетона от температуры

Материал	Марка битума	Расчетные значения кратковременного модуля упругости E, МПа, при температуре покрытия, °С				
		10	20	30	40	50
Плотный асфальтобетон	БНД 40/60	4400	2600	1300	690	430
	БНД 60/90	3200	1800	900	550	380
	БНД 90/130	2400	1200	660	440	350
	БНД 130/200	1500	800	560	380	320
	БНД 200/300	1200	600	420	350	300
	СГ 130/200	900	400	350	300	300
	СГ 70/130	800	350	300	250	250
	МГ 70/130	800	350	300	250	250

Динамический модуль упругости определяют по формуле (8.10), но при продолжительности действия нагрузки 0,1 с.

Релаксация напряжений — постепенное снижение, «рассасывание» напряжений в образце при его неизменной деформации.

Растянув образец асфальтобетона и закрепив его концы так, чтобы деформация оставалась неизменной в течение всего времени испытания, можно видеть уменьшение напряжений по времени или скорости уменьшения напряжений (рис. 8.14).

На характер релаксации напряжений в асфальтобетоне существенное влияние оказывает начальное напряжение, сообщаемое материалу.

Нагрузочные режимы, которые испытывают асфальтобетонные покрытия в летнее и зимнее время (скорость и частота приложения), могут быть одинаковыми, но деформационный

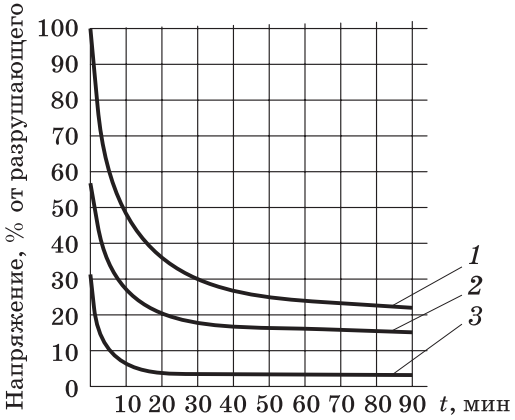


Рис. 8.14. Релаксация напряжений при растяжении асфальтобетона с битумом: *1* — БНД 40/60; *2* — БНД 60/90; *3* — БНД 90/130

«отклик» на них будет различным в зависимости от температурного режима их работы.

Процесс нагружения — это совокупность двух одновременно протекающих процессов: роста напряжений и их релаксации (рассасывания).

При высоких положительных температурах интенсивность снижения напряжений (скорость релаксации напряжения) служит показателем деформационной сдвигоустойчивости.

При низких отрицательных температурах возникновение трещин можно предупредить в том случае, если напряжения будут рассасываться быстро. Поэтому при низких температурах показателем трещиноустойчивости асфальтобетона может быть также интенсивность снижения напряжений, т.е. релаксация напряжения.

8.6.5. Устойчивость асфальтобетона к водно-тепловым и химическим факторам

Вода — наиболее агрессивный фактор для всех строительных материалов. Асфальтобетонные покрытия дорог испытывают круглогодичное воздействие воды в виде атмосферных осадков и талых вод. При длительном увлажнении вследствие ослабления структурных связей может происходить выкрашивание минеральных зерен, что приводит к повышенному коррозионному износу покрытий и образованию выбоин.

Водостойкость асфальтобетона зависит от его плотности и прочности адгезии битумной пленки к поверхности минеральных заполнителей.

Вода, как полярная жидкость, хорошо смачивает все минеральные материалы и при длительном контакте способна проникать под битумную пленку. Такая ситуация наиболее вероятна при контакте влаги с кислыми минеральными материалами, которые не имеют прочного хемосорбционного взаимодействия с битумом.

При воздействии транспортных нагрузок процесс «сдирания» битумных пленок с поверхности минеральных зерен усиливается при наличии влаги.

Сорбированные молекулы воды легко мигрируют по обнаженным (от битума) поверхностям минеральных частиц, что резко снижает структурную прочность асфальтобетона. Вода, проникая в микродефекты структуры асфальтобетона, приводит к адсорбционному понижению прочности материала (проявляется эффект Ребиндера). Это происходит вследствие снижения поверхностной энергии стенок трещины и ослабления структурных связей у вершины трещины по мере ее развития. Перемещаясь в порах, вода вызывает неравномерное распределение напряжений, что также интенсифицирует процессы разрушения асфальтобетона.

Значительно разрушают структуру асфальтобетона его частые попеременные увлажнение и высыхание.

Остаточная пористость асфальтобетона оказывает большое влияние на водостойкость асфальтобетона. Для асфальтобетонов разных типов эта пористость составляет от 1 до 5 % по объему. Поры в асфальтобетоне могут быть открытые и зам-

кнутые. С уменьшением размера зерен увеличивается количество замкнутых, недоступных воде пор.

Водостойкость асфальтобетона характеризуется значениями водонасыщения, набухания и коэффициента водостойкости (отношения прочности водонасыщенных образцов асфальтобетона к прочности сухих образцов).

Водонасыщение для асфальтобетонов различных типов колеблется в пределах от 1 до 4 % по объему, *набухание* — от 0,5 до 1,5 % по объему.

Коэффициент водостойкости должен быть при длительном водонасыщении в агрессивной среде для асфальтобетонов из горячих смесей типов А, Б, В, Г, Д после 14 сут. — не менее 0,75...0,85, для ЩМА — не менее 0,90.

Морозостойкость. Зимой вода в порах асфальтобетона замерзает и, переходя в лед, увеличивается в объеме на 9...10 %, что создает в них давление более 200 МПа.

Наибольшие разрушения асфальтобетонных покрытий происходят в осенне-весеннее время, когда наблюдается значительное число циклов попеременного замораживания-оттаивания и перехода через нулевую температуру. Знакопеременные температуры вызывают цикловые увеличения внутрипоровых напряжений, что приводит к образованию трещин на асфальтобетонных покрытиях.

Морозостойкость асфальтобетона оценивается *коэффициентом морозостойкости*, показывающим снижение прочности асфальтобетонных образцов при сжатии после установленного количества циклов замораживания-оттаивания.

Исследования показали, что каркасный асфальтобетон обладает меньшей морозостойкостью, чем асфальтовый раствор (песчаный асфальтобетон). Это объясняется повышенной пористостью каркасных бетонов.

Снижение морозостойкости асфальтобетона наблюдается при уменьшении вязкости битума (табл. 8.8). Морозостойкость асфальтобетона также зависит от характера взаимодействия битума с минеральным материалом. Так, морозостойкость асфальтобетона на щебне из плотного известняка (основная порода) выше, чем на гранитном щебне (кислая порода). Это объясняется тем, что природа связи в системе битум — известняк

хемосорбционная (химическая), а природа связи битум — гранит — физическая. Поэтому напряжения, возникающие при замерзании воды, легко разрушают менее прочные физические связи и слабо разрушают химические.

Таблица 8.8

Зависимость морозостойкости асфальтобетона от вязкости (марки) битума

Тип системы	Марка битума	Коэффициент морозостойкости после 50 циклов
Асфальтовый раствор	БНД 60/90 БНД 90/130	0,86 0,79
Асфальтобетон	БНД 60/90 БНД 90/130	0,82 0,77

Повысить водо- и морозостойкость асфальтобетона можно путем выбора материалов надлежащего качества, тщательного проектирования состава и применения ПАВ.

8.6.6. Стандартные требования к свойствам горячих, теплых и холодных асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов

В настоящее время в Беларуси требования к свойствам асфальтобетонных смесей и асфальтобетонам регламентируются СТБ 1033–2004 «Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия» и СТБ 1115–2004 «Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытаний».

Стандарт СТБ 1033–2004 распространяется на асфальтобетонные смеси, применяемые для устройства покрытий и оснований автомобильных дорог, аэродромов, городских улиц и площадей, дорог промышленных предприятий, а также на асфальтобетон (уплотненную асфальтобетонную смесь). Он устанавливает требования к показателям физико-механических свойств плотных асфальтобетонов из горячих, теплых и холодных смесей.

Для горячих, теплых и холодных смесей в СТБ 1033–2004 нормируется ряд показателей (табл. 8.9); методы испытаний стандартизированы в СТБ 1115–2004.

Таблица 8.9

Физико-механические свойства асфальтобетона из горячих, теплых и холодных смесей

Показатель	Плотный асфальтобетон из горячих и теплых смесей	Пористый и высокопористый асфальтобетон из горячих и теплых смесей	Асфальтобетон из холодных смесей
Пористость минерального остова, % по объему (в указанных пределах)	+ (для асфальтобетонов всех типов и ЩМА)	+	+ не более указанных пределов
Остаточная пористость, % по объему (в указанных пределах)	+ (для асфальтобетонов всех типов и ЩМА)	+	+
Водонасыщение, % по объему (в указанных пределах)	+ (для асфальтобетонов всех типов и ЩМА)	+	+
Набухание, % по объему, не более (в указанных пределах)	+ (для асфальтобетонов всех типов)	+	+
Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре 50 °С, не менее	+ (для асфальтобетонов всех типов и ЩМА)	+ при температуре 20 °С + при температуре 50 °С (не менее указанных пределов)	+ при температуре 20 °С (не менее указанных пределов до и после прогрева)

Окончание табл. 8.9

Показатель	Плотный асфальтобетон из горячих и теплых смесей	Пористый и высокопористый асфальтобетон из горячих и теплых смесей	Асфальтобетон из холодных смесей
Предел прочности при растяжении, МПа, при температуре 0 °С (в указанных пределах)	+ (для асфальтобетонов всех типов и ЩМА)	+ при температуре 20 °С + при температуре 50 °С	—
Коэффициент водостойкости при длительном насыщении в агрессивной среде, не менее указанных пределов: после 14 сут. после 28 сут.	(для асфальтобетонов всех марок и ЩМА) + +	 + –	+ (после 14 сут. в агрессивной среде до и после прогрева)
Однородность смеси по коэффициенту вариации для асфальтобетонов из горячих смесей по пределу прочности при сдвиге при температуре 50 °С, не более указанных пре делов для марок I и II	+ (для асфальтобетонов всех типов и ЩМА марки I и II)	—	—

Индекс сопротивления пластическим деформациям, не менее указанного предела	+ (для асфальтобетонов всех типов, марка I и ЩМА)	—	—
Индекс трещиностойкости, не менее указанного предела	+ (для асфальтобетонов всех типов, марка I и ЩМА)	—	—
Предел прочности при сдвиге при температуре 50 °С, МПа, не менее указанных пределов	+ (для асфальтобетонов всех типов и ЩМА)	—	—
Коэффициент морозостойкости после 50 циклов замораживания-оттаивания, не менее указанных пределов	+ (для асфальтобетона А, Б, марка I и ЩМА)	—	—
Стекание вяжущего для щебеночно-мастичных смесей, %, не более указанного предела	+ (для ЩМА, марка I)	—	—
Слеживаемость смеси, число ударов, не менее указанного числа	—	—	+

Примечание. Знак «+» означает наличие требования, «–» — его отсутствие в СТБ 1033–2004.

Область применения асфальтобетонов при устройстве слоев покрытий автомобильных дорог и городских улиц приведены в приложении А СТБ 1033–2004, при устройстве слоев покрытий аэродромов — в приложении Б этого же документа.

Разработка и обязательное применение таких нормативных документов повышает качество строительства и ремонта дорожных асфальтобетонных покрытий.

8.7. Проектирование состава асфальтобетона

Проектирование асфальтобетона — это комплексный процесс, позволяющий правильно назначить вид и соотношение его компонентов, т.е. состав, максимально обеспечивающий прочность и долговечность дорожного покрытия.

Проектированию состава асфальтобетона предшествует *подготовительный период*, который включает:

- анализ условий работы проектируемого асфальтобетона в конструкции дорожной одежды (интенсивность движения, транспортные нагрузки, погодно-климатические факторы);
- выбор исходных материалов с учетом их стоимости и дефицитности.

Сбор данных и их анализ заканчивается выдачей *технического задания* на расчет состава асфальтобетона с максимальным использованием местных материалов и экономией битума. При этом указывается вид и тип асфальтобетона, характеристика минеральных и вяжущих материалов.

Подобранный состав смеси распространяется на всю асфальтобетонную смесь данного типа, выпускаемую АБЗ из исходных материалов, независимо от объекта строительства.

Подбор состава, выполненный в соответствии с ТКП 094–2007 «Автомобильные дороги. Правила устройства асфальтобетонных покрытий и защитных слоев», утверждается главным инженером организации-изготовителя и согласовывается с главным инженером вышестоящей организации.

Расчет состава асфальтобетона состоит из следующих операций:

1) расчет состава минеральной части;
2) расчет оптимального количества битума;
3) приготовление и испытание контрольной смеси;
4) **составление технической документации на запроектированный асфальтобетон и выдача ее на производство.**

Расчет состава минеральной части. При подборе состава асфальтобетонной смеси содержание в нем минеральной части принимают за единицу, а содержание битума рассчитывают в процентах от массы минеральной части.

При определении расхода щебня, песка и минерального порошка полагают, что частицы крупнее 5 мм содержатся только в щебне, а мельче 0,071 мм — только в минеральном порошке (содержанием указанных частиц в песке пренебрегают).

Массовую долю *щебня* в составе минеральной части, %, можно определить по зависимости

$$Щ = \frac{100 - У_5}{100 - Щ_5}, \qquad (8.11)$$

где $Щ_5$ — требуемое среднее содержание частиц мельче 5 мм, %; $У_5$ — содержание частиц мельче 5 мм, которое находится в исходном щебне, % (по массе).

Значение $Щ_5$ принимают по СТБ 1033–2004:

- для плотных асфальтобетонов (верхние слои покрытий) из горячих и теплых смесей — по приложению В;
- для пористых и высокопористых асфальтобетонов (нижние слои покрытий и слои оснований) из горячих и теплых смесей — по приложению Д;
- для плотных асфальтобетонов (верхние слои покрытий) из холодных смесей — по приложению Г.

Для повышения качества приготовляемого асфальтобетона рекомендуется применять фракционированный щебень кубовидной формы.

Фракционирование осуществляют путем просевов: для крупнозернистого асфальтобетона — через сита с отверстиями 40, 20, 10 и 5 мм, для мелкозернистого — 20, 10 и 5 мм.

Массовую долю *минерального порошка*, %, определяют по формуле

$$М_{п} = \frac{K_{0,071}}{M_{0,071}} 100, \qquad (8.12)$$

где $K_{0,071}$ — требуемое среднее содержание частиц мельче 0,071 мм в минеральной части асфальтобетона, % (принимается для соответствующего вида и типа асфальтобетона по приложениям В, Д и Г, СТБ 1033–2004; $M_{0,071}$ — содержание частиц мельче 0,071 мм в исходном минеральном порошке, % (по массе).

Массовую долю *песка*, %, определяют по формуле

$$П = 100 - (Щ + М_{п}), \qquad (8.13)$$

где Щ — массовая доля щебня в составе минеральной части, %; $М_{п}$ — массовая доля минерального порошка, %.

Далее определяют содержание каждой фракции щебня ($\delta_{щ}$), песка ($\delta_{п}$) и минерального порошка ($\delta_{м.п}$) — частные остатки — в составе минеральной части асфальтобетона: частные остатки каждой фракции исходного материала умножают на его массовую долю в составе минеральной части (Щ, П, М.п):

$$\left.\begin{aligned} \delta_{щ} &= \alpha_{щ} \frac{Щ}{100}, \\ \delta_{п} &= \alpha_{п} \frac{П}{100}, \\ \delta_{м.п} &= \alpha_{м.п} \frac{М_{п}}{100}, \end{aligned}\right\} \qquad (8.14)$$

где $\alpha_{щ}$, $\alpha_{п}$, $\alpha_{м.п}$ — содержание соответствующих фракций в исходном щебне, песке и минеральном порошке, % по массе.

В соответствии с зависимостью (8.14) вычисляют общее содержание фракции данного размера в подобранной минеральной части асфальтобетона (т.е. частные остатки на соответствующих ситах).

По полученным частным остаткам определяют полные остатки, а по ним — просевы через те же сита для запроектированной минеральной части асфальтобетона, которые на-

носят на график зернового состава минеральной части асфальтобетона. Если состав минеральной части асфальтобетона не соответствует области оптимальных смесей, то соотношение между щебнем, песком и минеральным порошком изменяют и повторяют расчет.

Определение оптимального содержания битума. На основе результатов расчета состава минеральной части асфальтобетонной смеси делают несколько (обычно три) замесов смесей с различным содержанием битума в рекомендуемых СТБ 1033–2004 пределах. Образцы, изготовленные из смесей, подвергают испытанию для получения зависимости водонасыщения и предела прочности асфальтобетона при сжатии при температуре 50 °С ($R_{сж}^{50}$) от содержания битума.

В целях ускорения и упрощения работы оптимальное содержание битума можно рассчитывать по фактической пористости минеральной части и остаточной пористости асфальтобетона. Для этого на основе результатов расчета состава минеральной части готовят асфальтобетонную смесь с минимальным рекомендуемым содержанием битума по СТБ 1033–2004 или уменьшенным на 0,3...0,5 %. Испытанием трех образцов определяют среднюю плотность асфальтобетона и его минеральной части. По содержанию компонентов и их истинной плотности рассчитывают истинную плотность минеральной части, а затем ее фактическую пористость.

Требуемое содержание битума, %, определяют по зависимости

$$Б = \frac{\left(V^0 - V^a\right)\rho_б}{\rho_м}, \qquad (8.15)$$

где V^0 — фактическая пористость минеральной части, %; V^a — среднее значение требуемой остаточной пористости асфальтобетона в зависимости от его вида (плотный, пористый или высокопористый), % (по СТБ 1033–2004); $\rho_б$ — плотность битума (для практических расчетов может быть принята равной 1 г/см^3); $\rho_м$ — истинная плотность минеральной части асфальтобетона, г/см^3.

Из асфальтобетонной смеси с рассчитанным содержанием битума изготавливают три образца для определения остаточной пористости асфальтобетона. Если значение остаточной пористости асфальтобетона больше или меньше требуемого, готовят новую смесь, соответственно с бóльшим или меньшим содержанием битума.

При расчетах составов холодных асфальтобетонных смесей для предотвращения их слеживаемости полученное значение оптимального содержания битума уменьшают на 10...15 %.

Из смеси запроектированного состава изготавливают контрольные образцы и осуществляют полный цикл их испытаний в соответствии с СТБ 1033–2004. Показатели свойств асфальтобетона, полученные в результате испытаний, должны соответствовать требованиям СТБ 1033–2004.

8.8. Основы технологии приготовления асфальтобетонных смесей, их транспортирование, укладка и уплотнение

От степени уплотнения АБС зависят все физико-механические и структурно-механические свойства асфальтобетона в дорожном покрытии.

8.8.1. Теоретические положения

Технология изготовления асфальтобетона — совокупность методов подготовки щебня, песка, минерального порошка и битума, их смешивания при определенной температуре, транспортировки смеси, ее укладки и уплотнения до заданной плотности.

Таким образом, цель данной технологии — получить материал из смеси компонентов запроектированного состава, т.е. монолитный дорожный композит (покрытие, основание) с заданными свойствами. Поставленная цель достигается направленным структурообразованием асфальтобетона в двух

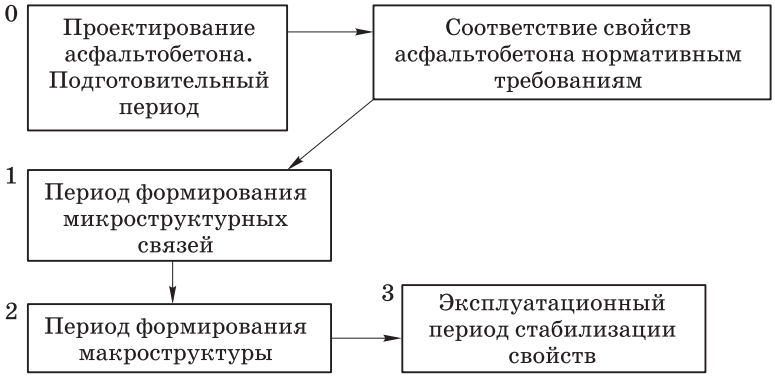


Рис. 8.15. Последовательность структурообразования асфальтобетона

основных периодах технологических переделов (1 и 2) и в завершающем периоде (3) работы покрытия (рис. 8.15).

В течение *подготовительного периода* осуществляют выбор, подготовку компонентов и проектирование состава асфальтобетона.

В *первом (основном) периоде* происходит формирование микроструктурных связей. Он включает подогрев минеральных материалов и битума до заданной температуры, перемешивание всех компонентов и транспортирование смеси к месту укладки. Основная задача технологии получения однородной асфальтобетонной смеси — разрушение первичных точечных контактов между частицами, равномерное распределение всех компонентов в объеме смеси и полное обволакивание минеральных зерен битумом. При транспортировании смеси происходит дальнейшее распределение битума в ее объеме. При длительной перевозке возможно расслоение, поэтому в этом случае лучше всего перевозить смесь в автомобилях-мешалках.

Во *втором (завершающем) периоде* формируется макроструктура асфальтобетона. Период включает укладку и уплотнение асфальтобетонной смеси, в результате чего происходит формирование макроструктурных связей и интенсив-

ное сближение зерен смеси до максимальной плотности покрытия.

При сближении частиц свободный битум выжимается из зон повышенного уплотняющего напряжения. Он заполняет пустоты межзернового пространства и на поверхности минеральных частиц формируется пленка структурированного битума. При этом коагуляционные связи в асфальтобетоне упрочняются, а прочность уплотняемого слоя покрытия возрастает.

В каркасных асфальтобетонах (более 60 % щебня) при уплотнении смеси тяжелыми механизмами происходит частичный переход коагуляционных связей в более структурированные — конденсационные.

Для оптимального уплотнения смесей необходимо применять вибрационные катки, которые оборудованы устройством, регулирующим режим уплотнения в зависимости от изменения температуры остывающего слоя.

Третий (эксплуатационный) период характеризуется дальнейшим формированием структуры асфальтобетона в результате доуплотнения покрытия под воздействием движения автомобилей. Процесс доуплотнения связан с увеличением вязкости битума вследствие упрочнения структурных связей на границе раздела минеральный материал — вяжущее (происходит уменьшение содержания масел, структурирование смол). На поверхности крупных заполнителей из горных карбонатных пород протекают процессы стабилизации структурированного битума за счет появления необратимых новообразований в зоне контакта. При этом «не остается» свободного битума, испытывающего окисление атмосферными факторами.

Наоборот, минеральный материал из кислых горных пород не вызывает активной сорбции битума и его структурной трансформации. Поэтому значительная доля битума остается в свободном состоянии и вероятность его окисления атмосферными факторами наиболее вероятна.

Массовые разрушения асфальтобетона в начальный период эксплуатации связаны с недостаточной водо- и морозостойкостью асфальтобетона, а также недоуплотнением асфальтобетон-

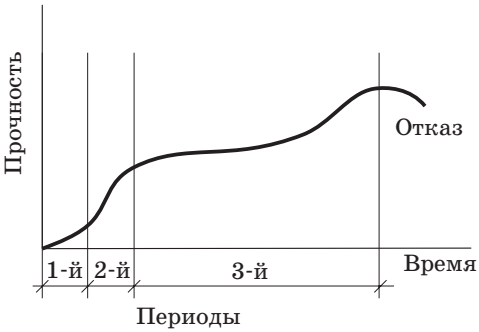


Рис. 8.16. Периоды формирования структуры асфальтобетона

ной смеси. Установлено, что деформативность асфальтобетона при недоуплотнении снижается на 25...30 %.

Схематично «жизненный» цикл асфальтобетона в дорожном покрытии показан на рис. 8.16.

8.8.2. Производство асфальтобетонных смесей

Асфальтобетонные смеси (горячие, теплые и холодные) изготавливают на стационарных или передвижных асфальтобетонных заводах (АБЗ). Первые строятся там, где имеется постоянная потребность в асфальтобетонных смесях — в городах, у крупных транспортных узлов. Передвижные (временные) АБЗ создают при строительстве или реконструкции магистральных автомобильных дорог.

Удаленность завода от места укладки горячей или теплой смеси определяет продолжительность ее транспортирования, которая не должна превышать 1,5 ч. Целесообразный радиус обслуживания строящихся автомобильных дорог с одного АБЗ составляет 50...60 км. Расстояние транспортирования холодной асфальтобетонной смеси не имеет ограничения и определяется технико-экономическими расчетами.

Выбор площадки для АБЗ определяют из условий наименьшего расстояния транспортирования готовой смеси и исходных материалов, наличия железнодорожных и водных путей, энерго-, водоканализационного хозяйства и других мест-

ных условий. Наилучшее место для размещения АБЗ выбирают на основе технико-экономических изысканий. Современный уровень развития техники позволяет полностью механизировать и автоматизировать производство асфальтобетонных смесей на АБЗ.

В зависимости от принятой схемы организации работ, АБЗ могут быть с производством асфальтобетонной смеси на привозных, готовых к применению фракционированных материалах и минеральном порошке, или на материалах, приготовленных здесь же, на заводе. Опыт показал преимущества централизованной переработки каменных материалов и доставки на АБЗ фракционированного щебня и готового минерального порошка.

В состав АБЗ входят:

- смесительный цех, состоящий из машин и агрегатов, предназначенных для приготовления асфальтобетонной смеси из подготовленных соответствующим образом материалов;
- битумное хозяйство, включающее наземные хранилища, битумоплавильные котлы, насосные станции, битумопроводы;
- склады щебня, песка и минерального порошка (цилиндрические емкости, подобные емкостям для хранения цемента);
- лаборатория, контролирующая качество исходных материалов, технологию производства и качество выпускаемой продукции (асфальтобетонной смеси);
- энерго- и паросиловое хозяйство (если необходимо);
- устройства для обеспечения сжатым воздухом и водой;
- средства для внутризаводского транспортирования материалов и др.

Поступающие на завод минеральные материалы выгружают на специальные площадки, которые должны иметь твердое покрытие. Рекомендуется устраивать крытые склады или навесы для хранения 10–15-дневного запаса щебня мельче 20 мм и песка. Минеральный порошок хранят в закрытых помещениях бункерного типа или в силосах. Для механизации складских операций обычно применяют автопогрузчики, ленточные конвейеры, транспортные эстакады и другие машины и механизмы.

Битум поступает на АБЗ в бункерных полувагонах или цистернах и сливается (перекачивается) в наземные хранилища. При расположении НПЗ на расстоянии до 300 км битум можно доставлять на АБЗ автобитумовозами.

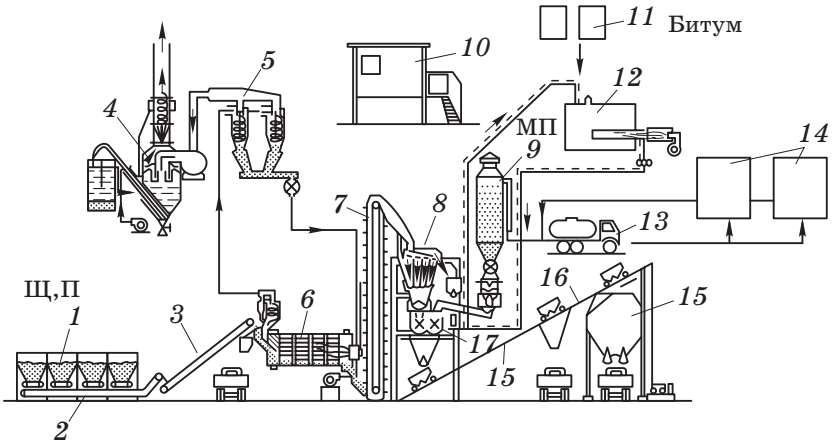


Рис. 8.17. Схема производства асфальтобетонной смеси по традиционной технологии:

1 — бункеры агрегата питания щебня и песка; *2* — горизонтальный сборный ленточный конвейер (в нижней части агрегата питания); *3* — наклонный ленточный конвейер; *4* — мокрый пылеуловитель для неосажденной тонкой пыли; *5* — пылеулавливающее устройство (блок циклонов) для осаждения пыли; *6* — сушильный барабан; *7* — горячий элеватор; *8* — сортировочное устройство (грохот) смесительного агрегата; *9* — бункер для минерального порошка; *10* — кабина оператора; *11* — наземные битумохранилища; *12* — емкость для выпарки битума и его нагрева до рабочей температуры; *13* — автотранспорт для минерального порошка; *14* — склад минерального порошка (цилиндрические емкости); *15* — накопительный бункер для готовой смеси; *16* — скиповый подъемник горячей смеси; *17* — смеситель

Асфальтобетонную смесь приготовляют в асфальтосмесителях принудительного перемешивания периодического действия с предварительным просушиванием, нагревом и дозированием минеральных материалов. Ввиду наиболее широкого распространения этой технологии она названа *традиционной*.

Примерный перечень основных асфальтосмесительных установок приведен в приложении А ТКП 094–2007 «Автомобильные дороги. Правила устройства асфальтобетонных смесей и защитных слоев».

Согласно традиционной технологической схеме (рис. 8.17) для получения готовой асфальтобетонной смеси осуществляются следующие операции:

1. **Холодный влажный песок и щебень подаются со склада** в бункер агрегата питания *1* с помощью погрузчиков, кранов с грейферным захватом или конвейеров.

2. **Из бункеров агрегата питания холодный влажный песок** и щебень непрерывно подаются с помощью питателей в определенных пропорциях на сборный ленточный конвейер *2*, расположенный в нижней части агрегата питания.

3. **Со сборного конвейера материал поступает на наклонный** ленточный конвейер *3*, который загружает холодные и влажные песок и щебень в барабан сушильного агрегата *6*. В барабане песок и щебень высушиваются и нагреваются до рабочей температуры. Нагрев материала осуществляется вследствие сжигания жидкого или газообразного топлива в топках сушильных агрегатов. Образующиеся газы и пыль поступают в пылеулавливающее устройство *5*, состоящее из блока циклонов, в которых пыль осаждается. Неосажденная тонкая пыль улавливается мокрым пылеуловителем *4* и удаляется в виде шлама.

4. Нагретые до рабочей температуры (180...200 °С) песок и щебень поступают из сушильного барабана на горячий элеватор *7*, который подает их в сортировочное устройство *8* (горячий грохот) смесительного агрегата. Сортировочное устройство разделяет материалы на фракции по размерам зерен и подает их в бункеры для горячего материала. Из этих бункеров песок и щебень различных фракций поступают в дозаторы и оттуда в смеситель 17.

5. В смесителе *17* горячие заполнители (щебень, песок), отдозированные горячий битум и холодный минеральный порошок перемешиваются. Затем готовая смесь выгружается в автомобили-самосвалы (или в специальные закрытые автомобили-емкости с теплоизолирующими стенками) или направляются в накопительные бункеры *15* с помощью скипового подъемника *16*.

Минеральный порошок поступает из бункера *9*, в который он подается из емкостей-силосов *14*, с помощью автомобильных средств для транспортирования *13*.

Битум из наземного хранилища *11* с помощью нагревательно-перекачивающего агрегата подается в битумоплавильню *12*

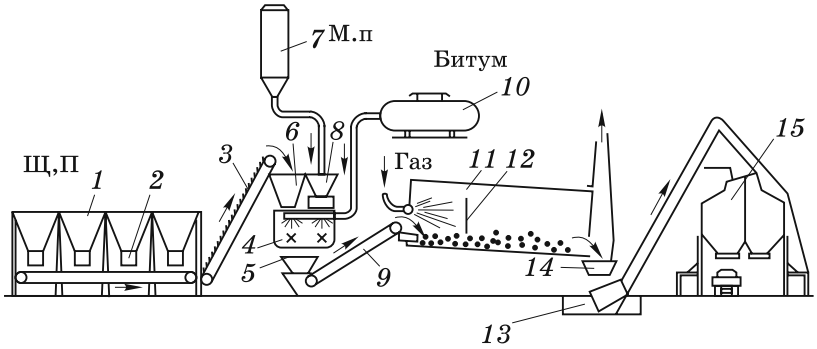


Рис. 8.18. Схема производства асфальтобетонной смеси по беспыльной технологии:
1 — бункеры агрегата питания заполнителей; *2* — дозаторы порционного действия; *3* — ленточный конвейер; *4* — смеситель; *5* — приемный бункер смеси; *6* — приемный бункер смесителя; *7* — силосная емкость для минерального порошка; *8* — дозатор минерального порошка; *9* — ленточный конвейер для подачи смеси в сушильный барабан; *10* — нагревательный агрегат битума; *11* — сушильный барабан; *12* — экран от прямого воздействия газовой (мазутной) форсунки; *13* — ковш скипового подъемника; *14* — приемный бункер готовой смеси; *15* — бункер-накопитель

для испарения влаги и нагревания до рабочей температуры. После этого он дозируется и подается в смеситель 17.

Управление асфальтосмесительными установками осуществляется из кабины оператора *10*.

Для уменьшения образования пыли при производстве асфальтобетонной смеси используют асфальтосмесители, работающие по *беспыльной технологии* (рис. 8.18). Влажный щебень и песок из бункеров агрегата питания *1*, отдозированные дозаторами порционного действия *2*, подаются ленточным конвейером *3* в приемный бункер *6* смесителя *4*. Минеральный порошок из силосной банки *7* подается на дозатор *8*. В смеситель *4* выгружаются все холодные минеральные материалы и под давлением впрыскивается отдозированный горячий битум, поступающий из нагревательного агрегата *10*. Смесь перемешивается, выгружается в бункер *5* и подается ленточным конвейером *9* в сушильный барабан *11*. Смесь минеральных

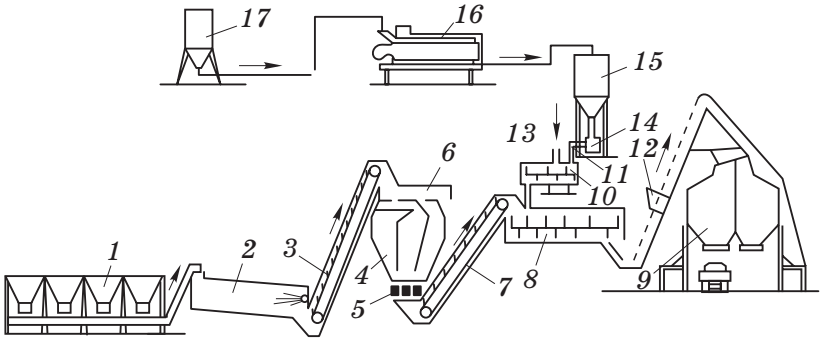


Рис. 8.19. Схема производства асфальтобетонной смеси по двухступенчатой технологии:
1 — агрегат питания заполнителей; *2* — сушильный барабан; *3* — горячий элеватор; *4* — бункер для минеральных материалов, прошедших через грохот; *5* — дозаторы; *6* — грохот; *7* — элеватор; *8* — смеситель непрерывного действия; *9* — бункеры-накопители; *10* — вибросмеситель минерального порошка; *11* — шнек-питатель минерального порошка; *12* — скиповый подъемник горячей асфальтобетонной смеси; *13* — подача отдозированного горячего битума; *14* — дозатор горячего минерального порошка; *15* — горячий бункер минерального порошка; *16* — сушильно-нагревательный агрегат для минерального порошка; *17* — силосные банки для минерального порошка

материалов с равномерно распределенными капельками битума нагревается. Вода испаряется, битум обволакивает минеральные зерна. Экран *12* предохраняет смесь от перегрева. Готовая смесь попадает в бункер *14* и ковшом *13* скипового подъемника подается в бункер-накопитель *15*.

Разработана также двухступенчатая технология производства асфальтобетонной смеси (рис. 8.19). Для приготовления асфальтовяжущего выбран вибросмеситель конструкции ВНИИСМ с объемом смесительной камеры 300 л типа ВСНД (вибросмеситель двухвальный непрерывного действия) со следующими параметрами: частота вибрации до 1000 об./мин, амплитуда до 3 мм, скорость вращения лопастных валов не более 45...60 об./мин.

Песок и щебень из агрегата питания *1* по транспортеру подают в сушильный барабан *2*. Далее сухие горячие заполнители попадают в элеватор *3*, затем через грохот *6* в бункеры *4* и далее на непрерывные дозаторы *5*, откуда элеватором *7* в смеситель непрерывного действия *8*.

Холодный минеральный порошок из силосной банки *17* поступает в сушильный барабан *16*, затем из горячего бункера *15* на дозатор непрерывного действия *14* и шнеком-питателем *11* в вибросмеситель *10*. Сюда же по битумопроводу подается горячий битум *13*.

Из вибросмесителя асфальтовяжущее поступает в асфальтосмеситель, где происходит его объединение с заполнителями.

Готовая асфальтобетонная смесь поступает по скиповому подъемнику *12* в бункерный накопитель *9*, а оттуда — в транспортное средство.

Двухступенчатая технология, включающая приготовление асфальтовяжущего в специальном смесителе, позволяет получать асфальтобетоны более высокого качества, чем по традиционной технологии. В смесителях для асфальтовяжущего достигается полная дезагрегация порошка, образование «свежих» поверхностей, наиболее активно взаимодействующих с битумом. В этих смесителях можно приготавливать модифицированное связующее, вводить добавки, придающие ему эластичные свойства, микроармировать его и др.

Эта технология позволяет избирательно обрабатывать мелко- и грубодисперсные минеральные материалы различными вяжущими. Так, для повышения долговечности асфальтобетона щебень и песок из кислых горных пород обрабатывают ПАВ катионного типа или смолами твердых топлив, а на них выгружают асфальтовяжущее с ПАВ анионного типа и смешивают. Можно также щебень и песок обрабатывать одним вяжущим (например, каменноугольным дегтем), а минеральный порошок — другим (например, битумом). Это позволит расширить ресурсы органических вяжущих и решить ряд экономических и экологических задач. Оптимальное количество битума по этой технологии уменьшается на 10...15 % по массе.

Двухступенчатая технология может быть реализована в *асфальтосмесителях турбулентного действия**.

Горячий жидкий битум, перемешанный с водой, с подогревом подается под давлением в барабан, где происходит перемешивание с заполнителем. Водяные пары, выделенные при подогреве из смеси, диспергируют битум и создают барьер, предотвращающий его окисление. Таким образом, нагрев и перемешивание происходят в нейтральной атмосфере водяного пара и газов сгорания, что уменьшает окисление битума.

Смесь включает 70 % мелкозернистого и 30 % крупнозернистого заполнителя. Можно использовать заполнитель с высокой влажностью, однако если она превышает 5 %, необходимо уменьшить количество воды, добавляемой к битуму.

Влага, содержащаяся в порах заполнителя, остается в нем в процессе перемешивания, а поверхностная влага удаляется, что приводит к уменьшению сцепления заполнителя с битумом. Поэтому часто в воду, добавленную к битуму, вводят химические добавки, способствующие хорошему сцеплению битума с заполнителем. Добавки вводят и в случае использования заполнителя, который плохо обволакивается битумом при низких температурах приготовления смеси. Влага, которая остается внутри смеси, служит смазкой и улучшает удобообрабатываемость смеси. Процесс обволакивания всего заполнителя в барабане происходит в течение 2,5 мин.

Количество загрязняющих воздух частиц, выделяющихся из смеси, незначительно при производительности смесителя 350 т/ч.

Горелка с автоматическим управлением расположена на впускном конце барабана, так что пламя направлено параллельно потоку движения заполнителя. При таком расположении горелки смесь подогревается равномерно по всему барабану. Холодный заполнитель после дозирования подается в барабан транспортером. Объемные дозаторы битума и воды электрической цепью связаны с пультом управле-

* Патент на процесс приготовления асфальтобетона методом турбулентного перемешивания заявлен в январе 1969 г.

ния. Смесь из барабана транспортируется на складскую площадку.

Процесс турбулентного перемешивания асфальтобетонной смеси обеспечивает высокую производительность установки, более низкую температуру смеси, хороший контроль дозировки заполнителя и битума, высокое качество смеси, меньшее загрязнение воздуха.

Асфальтобетонная смесь, приготовленная этим методом, уплотняется легче и быстрее, чем смесь, полученная в обычных смесителях.

В зависимости от назначения смеси ее приготавливают при температуре 71...115 °С. Температура нагрева битума определяется его маркой (табл. 8.10).

Таблица 8.10

Температура нагрева битума для приготовления асфальтобетонных смесей (ТКП 094–2007)

Марка битума	Температура, °С
Горячая смесь: БНД 60/90, 90/130; БД 60/90, 90/130; БН 60/90, 90/130; БМА 70/100, 100/130	 130...150 150...160
Теплая смесь: БНД 130/200, 200/300; БД 130/200, 200/300; БН 130/200, 200/300 СГ 130/200	 110...130 80...110
Холодная смесь: СГ 70/130; МГ 70/130	 80...90

Температурный режим приготовления битумов с использованием ПАВ должен соответствовать требованиям ТКП 059–2007.

Модифицированный битум приготавливается в специальной установке с последующей его доставкой на АБЗ.

Температуры нагрева асфальтобетонной смеси при выгрузке из смесителя в зависимости от марки битума указаны в табл. 8.11.

Таблица 8.11

Температуры нагрева асфальтобетонных смесей при выгрузке из смесителя (ТКП 094–2007)

Вид смеси	Вид вяжущего и его пенетрация при 25 °С, мм$^{-1}$	Температура смеси, °С			
		при выпуске из смесителя	в асфальтоукладчике		при завершении уплотнения
			асфальтобетонов типов С, А, Б, П, ВП с содержанием щебня, гравия более 40 % по массе	асфальтобетонов типов В, Г, Д, П, ВП с содержанием щебня, гравия менее 40 % по массе	
Щебеночно-мастичная	Вязкий битум 60/90, 90/130	160...180	Не ниже 150	—	Не ниже 90
Горячая щебеночная, гравийная и песчаная	Вязкий битум 60/90 Вязкий битум 90/130 Модифицированный битум 70/100, 100/130	140...160 140...160 160...180	Не ниже 130 Не ниже 120 Не ниже 150	Не ниже 110 Не ниже 100 —	Не ниже 80 Не ниже 70 Не ниже 100
Теплая	Вязкий битум 130/200 Жидкий битум 130/200	120...140 90...115	Не ниже 100 Не ниже 70	Не ниже 80	— —
Холодная	Жидкий битум 70/130	80...100	Не ниже 5	—	—

При приготовлении ЩМА с использованием целлюлозных волокон или гранул на их основе (включая другие стабилизирующие добавки) эти вещества подаются в смеситель вместе с минеральным материалом.

Погрешность дозирования компонентов асфальтобетонной смеси не должна превышать:

- для щебня (гравия), песка — ±3 %;
- минерального порошка — ±2 %;
- стабилизирующих добавок в минеральной части — ±5 %;
- вяжущего (битума, модифицированного битума) — ±1,5 %;
- добавок в вяжущее (ПАВ и др.) — ±5 %.

Продолжительность перемешивания горячих, теплых и холодных асфальтобетонных смесей устанавливают в соответствии с техническими данными асфальтосмесительной установки. Режим приготовления должен обеспечивать однородность асфальтобетонной смеси и соответствие физико-механических свойств приготовленного асфальтобетона требованиям СТБ 1033–2004.

Асфальтобетонную смесь после окончания перемешивания следует выгружать из смесителя в накопительный бункер или в кузов автомобиля-самосвала. Вместимость накопительного бункера должна составлять не менее объема часовой производительности смесительной установки. Время нахождения смесей в бункере-накопителе не должно превышать 1,5 ч — для нижних слоев и смесей типа А, ЩМСц для верхнего слоя; 0,5 ч — для смесей других типов.

Для смесей с применением ПАВ и активированных минеральных порошков время нахождения в бункере-накопителе может быть увеличено соответственно до 2 и 1 ч.

8.8.3. Требования безопасности при производстве асфальтобетонных смесей

При производстве смесей выделяются вредные вещества, содержание которых в воздухе рабочей зоны не должно превышать предельно допустимых концентраций (ПДК), регламентированных СанПиН 11-19 и приведенных в табл. 6.1 СТБ 1033–2004.

Лица, занятые на производстве смесей, должны быть обеспечены спецодеждой, спецобувью, средствами защиты рук, резиновыми перчатками.

В соответствии с ГОСТ 12.1.005–88 производственные помещения оборудуются местной и принудительной приточно-вытяжной вентиляцией, кабина оператора асфальтосмесительной установки оснащается кондиционером.

8.8.4. Транспортирование асфальтобетонных смесей

При дальности возки на расстояние более 20 км горячие и теплые смеси для предотвращения остывания транспортируются автомобилями-самосвалами, оборудованными тентами.

Во избежание прилипания смеси дно и стенки кузова предварительно смазывают нефтью, мазутом или мыльным раствором.

Продолжительность транспортировки асфальтобетонной смеси устанавливается из условия обеспечения температуры смеси в асфальтоукладчике (см. табл. 8.11). Время доставки смеси может также определяться расчетом в зависимости от конкретных условий доставки.

8.8.5. Укладка и уплотнение асфальтобетонной смеси в дорожной конструкции

Перед укладкой асфальтобетонной смеси основание должно быть тщательно подготовлено. Подготовка включает:

- проверку качества основания и устранение дефектов;
- очистку поверхности от пыли и грязи;
- обработку основания вяжущим для обеспечения надлежащего сцепления с покрытием.

Наибольший размер неровностей основания при проверке 3-метровой рейкой не должен превышать 6...8 мм. Хорошее сцепление покрытия с основанием, а также между слоями покрытия обеспечивается за счет обработки основания или нижнего слоя покрытия битумом или битумными эмульсиями.

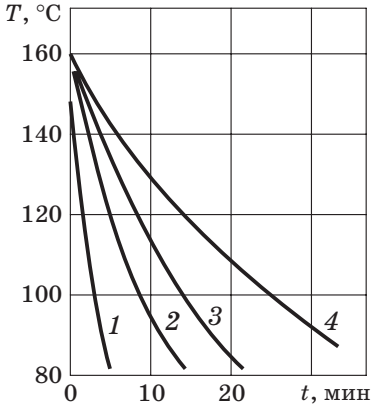


Рис. 8.20. Зависимость скорости охлаждения асфальтобетонной смеси от толщины слоя:
1 — 2 см; *2* — 4 см; *3* — 6 см; *4* — 8 см

Для получения ровного асфальтобетонного дорожного покрытия и обеспечения высокопроизводительной работы по его устройству организуется непрерывное и равномерное поступление асфальтобетонной смеси с температурой не ниже указанной в табл. 8.11. При температуре воздуха 10 °С скорость охлаждения асфальтобетонной смеси, уложенной при температуре 160 °С, зависит от толщины укладываемого слоя (рис. 8.20).

Покрытие строит механизированное звено в составе самоходного асфальтоукладчика (одного или двух), одного легкого и двух тяжелых катков на каждый укладчик. Асфальтоукладчик (например, марки Д-150Б) состоит из приемного бункера, шнека, распределяющего смесь по ширине укладываемой полосы, трамбующего бруса, выглаживающей плиты, ходовой части, двигателя. Марки асфальтоукладчиков приведены в приложении А ТКП 094–2007.

Самоходные асфальтоукладчики одновременно с укладкой предварительно уплотняют смесь.

Поверхность слоя после прохода укладчика перед уплотнением должна быть ровной, однородной, без разрывов и раковин.

Далее асфальтобетонную смесь уплотняют катками, примерный перечень и режим работы которых указан в приложении А ТКП 094—2007. Горячие плотные смеси уплотняют катками с массой и режимом работы (количеством проходов) в зависимости от типа асфальтобетонных смесей.

Уплотнение смесей из ЩМА и асфальтобетона с использованием модифицированного битума выполняют только гладковальцовыми катками массой не менее 10 т. Общее количество проходов должно быть не менее 12.

8.8.6. Контроль качества асфальтобетона

При устройстве асфальтобетонных покрытий контроль качества производится на стадиях приготовления асфальтобетонных смесей; укладки асфальтобетонных смесей; проверки готового покрытия.

При приготовления асфальтобетонных смесей контролируют:

- качество асфальтобетонных смесей, включая качество исходных материалов (по СТБ 1033–2004);
- температуру битума, минеральных материалов и готовой асфальтобетонной смеси в процессе ее производства — постоянно;
- качество ПАВ и адгезионных добавок принимают по паспорту и определяют показатель сцепления вяжущего с поверхностью минерального материала по СТБ 1115–2004 — для каждой партии;
- качество стабилизирующей добавки для ЩМА (по СТБ 1033–2004) — для каждой партии.

Каждая партия отгруженной потребителю смеси должна сопровождаться документом о качестве (паспортом смеси), в котором указывают:

- наименование и адрес изготовителя;
- наименование и адрес потребителя;
- номер и дату выдачи документа;
- дату и время изготовления и отгрузки смеси;
- вид, тип, марку смеси и ее условное обозначение, номер партии;

- массу и температуру отгруженной смеси;
- срок хранения (для холодных смесей).

При укладке асфальтобетонных смесей контролируют:

- температуру горячей и теплой асфальтобетонной смеси в каждом транспортном средстве (постоянно) и, при необходимости, в бункере асфальтоукладчика;
- качество продольных и поперечных сопряжений полос (визуально) — постоянно;
- ровность в продольном направлении и поперечные уклоны — постоянно.

Проверку *качества готового покрытия* осуществляют специальным прибором или, чаще всего, по показателю степени уплотнения конструктивного слоя дорожной одежды — коэффициенту уплотнения $K_у$. Этот показатель должен быть не ниже: 0,99 — для асфальтобетона из горячих и теплых смесей типов А и Б; 0,98 — для плотного асфальтобетона из горячих и теплых смесей типов В, Г и Д, пористого и высокопористого асфальтобетонов; 0,96 — для асфальтобетонов из холодных смесей.

Степень уплотнения конструктивного слоя дорожной одежды из ЩМСц контролируют по показателям остаточной пористости и водонасыщания кернов (вырубок), которые должны соответствовать СТБ 1033–2004.

Ровность покрытия определяют измерением просветов под трехметровой рейкой по ГОСТ 30412–96 или профилометрическим методом в соответствии с СТБ 1566–2005. Значения показателей ровности должны соответствовать разделу 11 ТКП 059–2007.

Качество сцепления колеса с покрытием автомобильной дороги характеризуется коэффициентом сцепления и нормируется ТКП 059–2007.

Величину коэффициента сцепления измеряют в соответствии с СТБ 1566–96 и ГОСТ 30413–96. Она должна быть не менее 0,45 и определяться проектной документацией.

При контроле за выполнением работ разрешается применять новые приборы, обеспечивающие необходимую точность измерений.

8.9. Штучные изделия из асфальтобетонных смесей

Для равномерной загрузки АБЗ в течение года широко применяется изготовление штучных изделий из асфальтобетонных смесей.

8.9.1. Общие положения

Идеи о широком использовании штучных изделий из асфальтобетона давно обсуждались специалистами и получили практическое воплощение главным образом в гидротехническом строительстве (укрепление берегов рек и каналов). Сборные изделия из асфальтобетона, армированного стальной сеткой, представляют собой гибкие ленты, которые наматываются на барабан и в таком виде перевозятся. Их укладка производится кранами (часто с понтонов при берегоукрепительных работах).

Применение асфальтобетонных плит в конструкциях дорожных одежд имеет ряд достоинств и при эксплуатации:

- основания из плит обладают большей, по сравнению со щебенистыми слоями, распределяющей способностью; их эффективность как гидроизоляционных прослоек возрастает на болотистой и переувлажненной местности;
- значительная толщина плит способствует уменьшению растягивающих напряжений в нижней части основания, что предотвращает появление трещин в покрытии.

Значительный вклад в решение проблемы формования и уплотнения асфальтобетонных изделий внесли А.С. Ростовцев, В.Н. Давыдов. Они заложили теоретические и практические основы эффективной вибрационной технологии формования и уплотнения песчаной асфальтобетонной смеси при изготовлении плит для устройства дорожных оснований.

В настоящее время разработана методика установления оптимальных составов смеси с учетом технологий ее формования и уплотнения.

Внедрение прогрессивной технологии и оптимальных составов позволяет сократить расход битума в смеси с 12 до 5...6 %, а прочностные показатели асфальтобетона в изделиях увеличить в 2,5...4 раза по сравнению с ранее применяемыми на производстве технологиями изготовления.

Анализ показывает, что применение сборных асфальтобетонных конструкций имеет ряд преимуществ по сравнению с монолитным способом устройства покрытий и оснований:

- круглогодичное и круглосуточное изготовление штучных асфальтобетонных изделий независимо от погоды и температуры воздуха;
- транспортирование изделий на любое экономически целесообразное расстояние, в связи с чем строительство может осуществляться на объектах, размещенных очень далеко от асфальтобетонных заводов;
- нет необходимости в АБЗ для производства асфальтобетонных смесей, транспорте для доставки смесей, укладочной и уплотняющей технике;
- легкое решение вопросов обеспечения исходными материалами, энергией, водой, паром, сжатым воздухом, подсобно-вспомогательными и бытовыми помещениями, ремонтной базой; охраны труда и охраны природы, что в конечном итоге ведет к повышению производительности труда, снижению стоимости строительства, представлению дополнительных рабочих мест;
- возможность замены привозных каменных материалов (использование отходов промышленного производства, например, отработанных формовочных смесей литейного производства).

Многолетние зарубежные и отечественные исследования и накопленный практический опыт монолитного и сборного строительства из асфальтобетонных смесей создали необходимые предпосылки для разработки конструкций крупногабаритных плит из асфальтобетонных смесей для дорожного строительства.

8.9.2. Асфальтобетонные плиты (плиты СибАДИ), методы формования и область применения

Асфальтобетонными плитами (плитами СибАДИ*) называют прямоугольные плиты, сформованные из асфальтобетонных смесей (преимущественно песчаных), имеющие каркас из различных материалов (как правило, деревянных) и металлические петли для захвата краном. Каркас необходим только для восприятия монтажных усилий. Применение для монтажа вакуумных захватных приспособлений позволяет упростить конструкцию плиты и исключить деревянный каркас и петли.

Принципиальное отличие плит СибАДИ от ранее применяемых в гидротехническом строительстве крупногабаритных асфальтобетонных изделий заключается в том, что они имеют относительно жесткую, а не гибкую конструкцию.

В практике дорожного строительства наибольшее внимание получили асфальтобетонные плиты размером 174×299 см. Толщина плиты в конструкции дорожной одежды определяется расчетом и изменяется от 10 до 24 см в зависимости от состава автомобильного движения, его интенсивности, района строительства и грунтов земляного полотна, а также толщины других слоев дорожной одежды.

В ходе исследований и многолетнего производственного внедрения асфальтобетонных плит в Сибири установлена возможность их применения для устройства оснований в дорожных одеждах городских, загородных, лесовозных, сельскохозяйственных и временных дорог, механизированных зернотоков и площадок временного хранения и переработки зерна, полов складов промышленных и сельскохозяйственных предприятий, а также для благоустройства центральных усадеб и ферм колхозов, совхозов, агрогородков.

Дорожные одежды, возводимые с применением асфальтобетонных плит, обычно состоят из трех слоев (рис. 8.21, *а*):

1) нижний подстилающий — из укрепленных или неукрепленных минеральных материалов;

* СибАДИ — Сибирский автомобильно-дорожный институт.

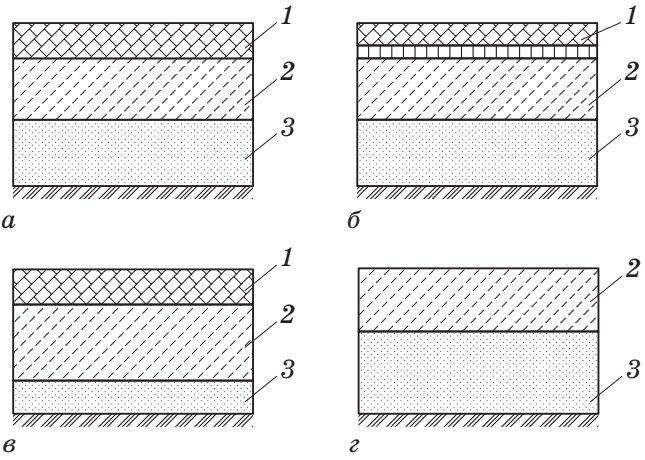


Рис. 8.21. Конструкции дорожных одежд с применением асфальтобетонных плит:
1 — слой монолитного асфальтобетона; *2* — асфальтобетонная плита СибАДИ; *3* — подстилающий или выравнивающий слой из различных материалов

2) средний — из плит СибАДИ;

3) верхний — из монолитного асфальтобетона.

На дорогах **I и II технических категорий на плиты укладывают** два слоя асфальтобетона. Нижний слой из крупнозернистого асфальтобетона выполняет роль выравнивающего слоя, верхний из среднезернистого или мелкозернистого асфальтобетона является слоем покрытия или слоем износа (рис. 8.21, *б*).

При монтаже плит зимой перед их укладкой устраивают выравнивающий монтажный слой из песка толщиной 5...7 см (рис. 8.21, *в*).

Для строительства тротуаров, отмосток, укрепительных и других работ, где ровность поверхности не имеет решающего значения, применяют конструкции без омоноличивающего асфальтобетонного слоя (рис. 8.21, *г*).

На временных дорогах с малой скоростью движения грузовых автомобилей (лесовозных) применяют однопутные или колейные дорожные одежды (рис. 8.22, *а*, *б*). Иногда экономи-

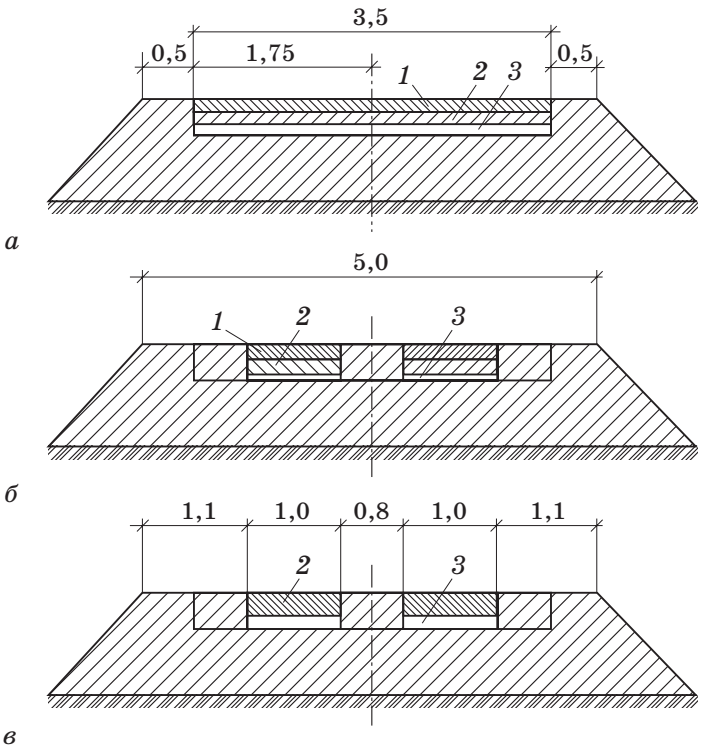


Рис. 8.22. Однопутные и колейные дорожные одежды: *а* — однопутная из плит шириной 175 см; *б* — колейная с омоноличивающим слоем; *в* — колейная без верхнего слоя; *1* — асфальтобетон; *2* — плита СибАДИ; *3* — подстилающий слой

чески более целесообразно применение конструкций с асфальтобетонными плитами без верхнего омоноличивающего слоя, и тогда движение автомобильного транспорта осуществляется непосредственно по плитам (рис. 8.22, *в*).

Транспортировать асфальтобетонные плиты целесообразно по железной дороге, а также автомобильным транспортом и транспортом, освободившимся от перевозок сельскохозяйственных грузов.

8.9.3. Рациональные составы асфальтобетонных смесей для изготовления плит

Исследования (В.Н. Давыдов) позволили определить пять наиболее рациональных составов смеси при двухрежимной технологии изготовления плит с предварительным виброперемешиванием (табл. 8.12) и три состава смеси при однорежимном вибрировании без виброперемешивания (табл. 8.13).

На основании выполненных исследований плиты классифицированы по категориям в зависимости от их прочностных свойств по расходу битума, минерального порошка и технологии изготовления. Тогда с использованием двухрежимного вибрирования представляется возможным изготавливать плиты пяти категорий в зависимости от требуемой прочности и с учетом их назначения (I, II, III, IV, V) (табл. 8.14).

Таблица 8.12

Рекомендуемые рациональные составы смеси при двухрежимной технологии

Категория плиты	Состав смеси	%	Б/МП
I	Песок Зола-унос ТЭС Битум БНД 60/90	90 10 6,0...6,5	0,60...0,65
II	Песок Зола-унос ТЭС Битум БНД 60/90	91 9 5,5...6,0	0,61...0,66
III	Песок Зола-унос ТЭС Битум БНД 60/90	92 8 5,0...5,5	0,62...0,69
IV	Песок Зола-унос ТЭС Битум БНД 60/90	93 7 4,5...5,0	0,64...0,71
V	Песок Зола-унос ТЭС Битум БНД 60/90	94 6 4,0...4,5	0,66...0,68

Таблица 8.13

Рекомендуемые рациональные составы смеси при однорежимной технологии

Категория плиты	Состав смеси	%	Б/МП
III-а	Песок Зола-унос ТЭС Битум БНД 60/90	90 10 8,5...9,0	0,85...0,90
IV-а	Песок Зола-унос ТЭС Битум БНД 60/90	91 9 8,0...8,5	0,89...0,94
V-а	Песок Зола-унос ТЭС Битум БНД 60/90	92 8 7,5...8,0	0,94...1,00

Таблица 8.14

Рекомендуемые области применения асфальтобетонных плит в зависимости от их категории

Категория плиты	Назначение
I	Для оснований дорожных одежд автомобильных дорог I и II категории, оснований аэродромных покрытий IV–V категории, для укрепления откосов каналов и т.п.
II	Для оснований дорожных одежд автомобильных дорог II категории, оснований аэродромных покрытий IV–V категории, для укрепления подтопляемых насыпей
III, III-а	Для оснований дорожных одежд автомобильных дорог III категории, рулёжных дорожек аэродромов, стоянок автомобилей и машин на пневмоколесном ходу
IV, IV-а	Для оснований дорожных одежд автомобильных дорог IV категории, устройства внутриквартальных проездов и тротуаров
V, V-а	Для оснований дорожных одежд автомобильных дорог низших категорий, устройства механизированных зернотоков и площадок временного хранения зерна, полов складов промышленных и сельскохозяйственных предприятий и других объектов аналогичного назначения

8.10. Регенерация старого асфальтобетона

Количество старого асфальтобетона, применяемого для повторного использования, растет из года в год. Вызвано это большими работами по реконструкции автомобильных дорог, строительством магистральных дорог в городах и др. Расчеты показывают, что в год накапливается до 15...20 млн т старого асфальтобетона, пригодного для переработки.

Раньше по мере разрушения асфальтобетонного покрытия изношенный слой заменяли новым или укладывали сверху еще слой асфальтобетона. Материал покрытий повторно не использовали. Старый асфальтобетон вывозили на свалку. Однако известно, что асфальтобетон, а главное битум в нем, возобновляем. Отработавший положенный срок материал можно специальными способами регенерировать и повторно использовать.

В настоящее время в зависимости от вида повреждений назначают различные способы регенерации асфальтобетона:

- выравнивание при нагреве асфальтобетонного покрытия со срезкой неровностей, засыпкой выбоин смесью, планировкой и уплотнением взрыхленного слоя катками;
- выравнивание при нагреве асфальтобетонного покрытия с добавкой новой смеси. Операции производятся на полотне дороги с помощью специальных машин (рис. 8.23).

Панели инфракрасного излучения разогревают асфальтобетонное покрытие до 180 °С. Блок с элементами рыхления и рядами ножей взрыхляет разогретый слой покрытия на глубину до 4 см, этот слой затем перемешивается шнековым распределителем и распределяется равномерно по всей ширине полосы. Одновременно транспортер из бункера подает новую смесь, которая равномерно распределяется по всей площади старой спланированной смеси. Далее регенерированный слой подгоняют под существующий профиль, предварительно уплотняют вибрационной трамбующей балкой и окончательно катками.

Развитием этого способа является способ, в котором старый взрыхленный асфальтобетон смешивается в стационар-

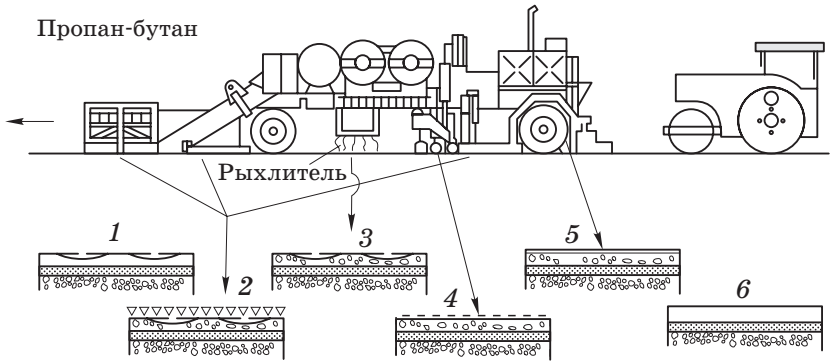


Рис. 8.23. Схема регенерации асфальтобетона на месте:
1 — состояние покрытия до ремонта; *2* — нагрев; *3* — рыхление;
4 — разравнивание, планирование; *5* — добавление новой смеси, разравнивание, предварительное уплотнение;
6 — отремонтированное покрытие

ной смесительной установке с новой смесью, выгружается, разравнивается и уплотняется.

Технологическая схема такой регенерационной асфальтосмесительной установки представлена на рис. 8.24. Кусковой старый асфальтобетон размером до 60 см из приемного бункера *1* подается питателем в щёковую дробилку *3*, откуда ленточным конвейером — на молотковую дробилку *4*, где измельчается до частиц мельче 40 мм на гранулят и непрерывным дозатором подается в сушильно-смесительный агрегат *9*. Необходимое количество добавочного щебня, песка и минерального порошка (обычно 20...40 %) из агрегатов питания *7* и силосной банки *6* непрерывными дозаторами также подается в сушильно-смесительный агрегат. Добавочное количество битума (обычно 2...4 % массы материала) подается в среднюю часть барабана. В барабанном смесителе происходит плавление гранулята, нагрев минеральной части и вбрызгивание битума. Готовая смесь выгружается в ковш скипового подъемника и направляется в бункер готовой продукции *14*, а затем в автомобиль-самосвал. Производительность установки составляет 30 т/ч.

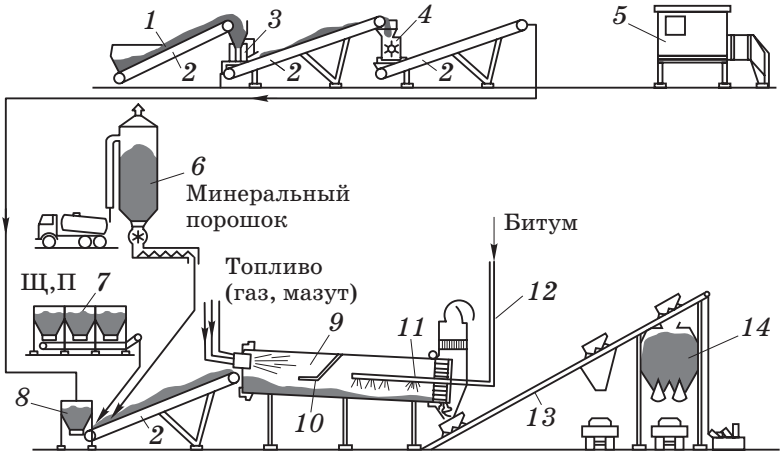


Рис. 8.24. Технологическая схема регенерационной асфальтосмесительной установки:
1 — приемный бункер для кусков старого асфальтобетона; *2* — конвейер; *3* — щёковая дробилка; *4* — молотковая дробилка; *5* — кабина управления; *6* — силосная банка для минерального порошка; *7* — агрегат питания для добавочного щебня и песка; *8* — приемный бункер для дробленого старого асфальтобетона, добавочного щебня и песка с непрерывным дозатором; *9* — сушильно-смесительный агрегат; *10* — экран; *11* — распылители битума; *12* — линия подачи битума; *13* — скиповый подъемник; *14* — накопительный бункер с затворным дозатором

Регенерация асфальтобетона может осуществляться и другими способами. Например, В.М. Гоглидзе предложил погружать куски асфальтобетона в горячую воду для ослабления структурной прочности старого асфальтобетона и облегчения его дальнейшего дробления.

Перспективным представляется, разработанная Я.Н. Ковалевым и А.П. Одерихо (БНТУ) технология, основанная на применении энергии электрогидравлического эффекта, где в качестве рабочей жидкости используется техническая вода. Схема такой технологии приведена на рис. 8.25.

Получаемая влажная регенерируемая асфальтобетонная смесь требует высушивания и нагревания до требуемых температур, что является основным недостатком таких методов.

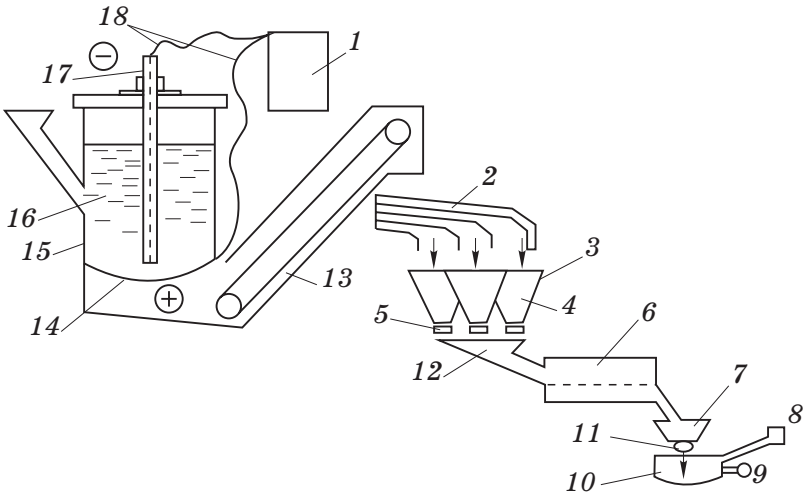


Рис. 8.25. Технологическая схема переработки *старого асфальтобетона* (Я. Н. Ковалев, А. П. Одерихо): *1* — генератор импульсных токов; *2* — грохот; *3* — бункер; *4* — отсеки для частиц; *5* — дозаторы; *6* — нагреватель (сушильный барабан); *7* — накопитель горячей смеси; *8* — дозатор вяжущих материалов; *9* — дозатор минерального порошка; *10* — смеситель; *11* — дозатор горячей смеси; *12* — загрузочная воронка; *13* — ковшовый элеватор; *14* — электрод-катод в виде сита; *15* — разрядная камера с рабочей жидкостью; *16* — рабочая жидкость (вода); *17* — электрод-анод; *18* — высоковольтные шлейфы для включения электродов в цепь ГИТ

8.11. Битумоминеральные материалы*

Для местных дорог с малоинтенсивным движением при строительстве покрытий и оснований дорожных одежд облегченного типа применять асфальтобетон не экономично. Для этих целей наиболее целесообразно использовать более дешевые ***битумоминеральные материалы (БММ)***:

* По данным Н.В.Горелышева.

- черный щебень, получаемый на АБЗ;
- чернощебеночные и черногравийные смеси, получаемые в передвижной установке;
- чернощебеночные и черногравийные смеси, получаемые на дороге;
- материал, получаемый в результате поверхностной обработки для существующих дорожных покрытий;
- материал, получаемый в результате пропитки битумом слоя щебня;
- влажные органоминеральные смеси (ВОМС);
- грунт, укрепленный битумом.

Все эти материалы отличаются от асфальтобетона меньшей прочностью, грубым дозированием компонентов, а следовательно, меньшей однородностью и работоспособностью в дорожных одеждах.

Тем не менее, именно эти материалы, а не асфальтобетон, объективно более целесообразны для покрытий и оснований на дорогах низких категорий, протяженность которых гораздо больше, чем дорог с капитальными покрытиями.

8.11.1. Общие положения

Битумоминеральные материалы можно разделить на три основные группы:

1) БММ, в которых применяются высокопрочные каменные материалы;

2) БММ, в которых можно применять малопрочные каменные материалы;

3) грунты, укрепленные органическими вяжущими (битумные эмульсии, жидкие битумы); это, как правило, бескаркасные материалы.

В материалах первой группы, получаемых в результате пропитки, смешения на дороге и в установке, поверхностной обработки, высокая прочность щебня необходима, потому что именно он образует каркас. Все зерна щебня контактируют со своими соседями непосредственно камнем по камню и в местах контактов концентрируются напряжения порядка 80...100 МПа. В слое поверхностной обработки прочный ще-

бень противостоит истирающему и шлифующему воздействию автомобильных колес.

В материалах второй группы слабый щебень допускается, потому что в них нет каркаса, а зерна щебня раздвинуты пластичной мелкозернистой смесью, высокой концентрации напряжений нет.

В битумоминеральных материалах применяется жидкий битум или комбинированное вяжущее (жидкий битум и цемент или известь). Материалы на основе жидких битумов всегда менее прочны, чем материалы с вязким битумом. Применение вязкого битума возможно только в виде эмульсии.

В составе битумоминеральных смесей вместо стандартного минерального порошка используются мелкие фракции смешиваемых материалов, вследствие чего прочность и водостойкость этих смесей меньше, чем у асфальтобетона.

Компоненты битумоминеральных материалов грубо дозированы, поэтому смеси по составу менее однородны, чем асфальтобетонные.

Битумоминеральные материалы применяют для строительства покрытий на дорогах III—IV и более низких категорий, а также в слоях оснований на дорогах всех категорий.

По структуре битумоминеральные материалы можно разделить на две группы:

- каркасные — черный щебень, пропитка, поверхностная обработка;
- бескаркасные — материалы смешения на дороге и в установке, ВОМС, смеси на органошлакощелочном вяжущем, укрепленные грунты.

Соответственно этим двум структурам существенно различаются требования к минеральным материалам для этих смесей. Так, для пропитки черного щебня, особенно для поверхностной обработки, требуется щебень высокой прочности, тогда как в остальных смесях применяют в большом количестве местные, в том числе малопрочные материалы.

В отличие от асфальтобетона, для приготовления битумоминеральных смесей можно применять минеральные материалы более низкого качества.

Более низкие требования предъявляются также к качеству минерального порошка и органических вяжущих (нефтяные гудроны, дегти, смолы).

Кажущаяся примитивность этих материалов служит причиной недостаточного к ним научного внимания, к некоторым из них не предъявляются требования по физико-механическим свойствам (черный щебень, материалы пропитки, поверхностная обработка). Однако для некоторых битумоминеральных материалов разработаны и действуют нормативные документы.

8.11.2. Битумоминеральные смеси каркасной структуры

Черный щебень — это щебень, обработанный органическими вяжущими в смесительной установке с принудительным перемешиванием. При приготовлении черного щебня по *горячей технологии* (смешение при температуре 120...140 °С) используют вязкие битумы БНД 60/90, БНД 90/130; по *теплой технологии* (температура смешения 50...80 °С) — битумы БНД 130/200, БНД 200/300; по *холодной технологии* — жидкие битумы МГ 70/130, МГ 130/200.

Для приготовления черного щебня применяют щебень из прочных горных пород прочностью не ниже 80 МПа. Количество вяжущего в зависимости от крупности минеральных частиц составляет 2...4 % по массе.

Слой покрытия из черного щебня толщиной 6...8 см имеет каркасную пористую структуру. При укатке его верхняя часть насыщается зернами мелких фракций.

Большая пористость слоя из черного щебня вызывает необходимость его защиты от атмосферных осадков, поэтому строительство покрытия завершают слоем поверхностной обработки.

Для защиты покрытия от разрушающего воздействия атмосферных осадков, талой воды, транспортных нагрузок на его поверхность ***методом поверхностной обработки*** наносят защитный слой, который одновременно является и сло-

ем износа. Поверхностная обработка применяется также для повышения шероховатости покрытия, поверхность которого стала скользкой под шлифующим воздействием движущихся автомобилей.

Защитный битумоминеральный слой образуется в результате розлива тонким слоем на поверхности покрытия горячего вязкого битума и россыпи на еще неостывший битум фракционированного щебня (обычного или черного). Применение прочного трудношлифуемого узкофракционированного щебня (10...15 мм) и соблюдение установленного режима работ повышают срок службы слоя поверхностной обработки до 4–5 лет.

Щебень для поверхностной обработки должен быть получен дроблением изверженных мелкокристаллических трудношлифуемых горных пород марки по дробимости не менее 1200, желательно мытый. Известняковый щебень, даже прочный, непригоден из-за высокой шлифуемости.

Битум для поверхностной обработки применяют марок БНД 60/90, 90/130 и 130/200. Введение в битум ПАВ обязательно. Возможно применение эмульсий.

Двойную поверхностную обработку применяют на щебеночных и гравийных покрытиях.

Получившийся в свежеуложенном слое битумоминеральный материал содержит 5 % битума. В процессе эксплуатации битум в промежутках между щебнем постепенно наполняется пылью и продуктами истирания выступающих из слоя частиц щебня, образуя со временем прочную мастику, удерживающую щебень от вырывания колесами даже при самом интенсивном движении.

При ***способе пропитки*** вначале распределяется каменный материал слоем определенной толщины. По этому слою разливается разогретый битум, который заполняет межпустотное пространство уложенного щебня. Поскольку щебень фракционирован, то объем пустот в слое не менее 40 % и битум легко проникает в эти пустоты. После этого следует повторная россыпь более мелкого щебня, укатка и розлив. При *полной (глубокой) пропитке* таких слоев может быть 3–4, *при полупропитке* — 2–3.

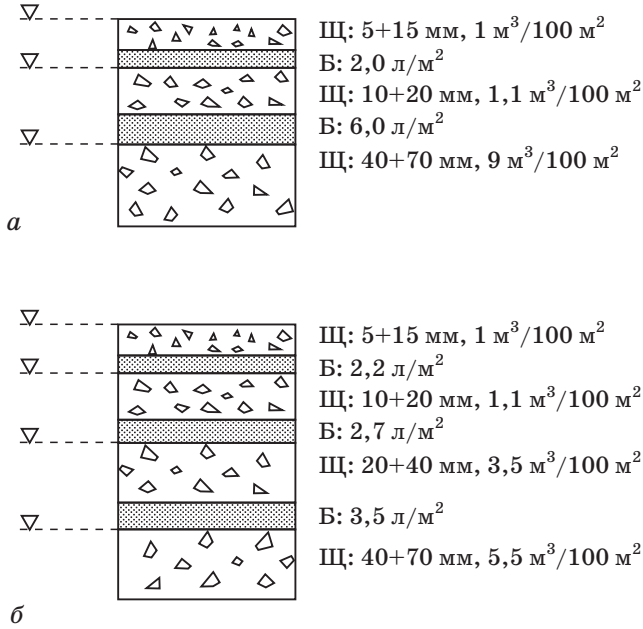


Рис. 8.26. Конструктивные слои пропитки с указанием мест укатки слоев (▽):
а — полупропитка трехслойная; *б* — глубокая пропитка четырехслойная

Мелкий щебень последующего слоя при укатке частично вдавливается в недоуплотненный предыдущий слой, расклинивая его зерна, что повышает плотность каждого слоя. Толщина слоя с глубокой пропиткой 6...8 см, с полупропиткой — 4,5...6 см.

Схема работ при пропитке показана на рис. 8.26.

Процесс пропитки основан на способности битума смачивать поверхность зерен щебня и самопроизвольно растекаться по этой поверхности.

Применение ПАВ способствует лучшему растеканию битума, повышает сцепление и водостойкость материала.

Каркасность структуры вызывает необходимость применения щебня марки по дробимости не ниже 800 для щебня из изверженных горных пород и 600 — из осадочных.

Марки вязкого битума при пропитке: БНД 60/90, 90/130, 130/200; температура битума при розливе соответственно 140…160 °С, 130…150 °С, 110…130 °С.

Свойства смесей, получившихся в результате пропитки, не нормируются, так как в лабораторных условиях изготовить образцы такой же структуры, как и материалы на дороге, практически невозможно.

8.11.3. Битумоминеральные материалы бескаркасной структуры

Битумоминеральные материалы, получаемые смешением в установке, отличаются от стандартизированного асфальтобетона пониженными требованиями к их физико-механическим свойствам, более широким ассортиментом минеральных материалов, главным образом местных.

Битумоминеральные материалы, получаемые смешением в установке, условно можно назвать асфальтобетоном четвертой марки.

По максимальному размеру минеральных зерен такие смеси делят на крупнозернистые (до 40 мм) и мелкозернистые (до 20 мм); по температуре смеси при укладке — на горячие, теплые и холодные; по плотности — на плотные и пористые.

Требования к качеству составляющих материалов для битумоминеральных смесей ниже, чем для асфальтобетона.

Щебень, чаще цельнодробленый без фракционирования, должен быть марки по дробимости не ниже 600 для изверженных пород и 300 — для осадочных.

В качестве минерального порошка допускается применение порошкообразных промышленных отходов — цементной пыли, золы-уноса, фильтр-прессных остатков и др.

Требования к битумам для этих смесей те же, что и для асфальтобетонных.

Кроме битумов, применяют дегти и битумные эмульсии (как самостоятельное вяжущее или в сочетании с цементом или известью).

Показатели физико-механических свойств плотных битумоминеральных смесей приведены в табл. 8.15, пористых — в табл. 8.16.

Режим приготовления, укладки и уплотнения битумоминеральных смесей тот же, что и у асфальтобетонных.

Таблица 8.15

Показатели физико-механических свойств плотных битумоминеральных смесей

Показатель	Нормы для смесей			
	с жидкими органическими вяжущими	с жидкими органическими совместно с минеральными вяжущими	с вязкими (в том числе и эмультированными) органическими вяжущими	с эмульгированными органическими совместно с минеральными вяжущими
Предел прочности на сжатие, МПа, не менее, при температурах:				
20 °С	1,2	1,5	1,6	1,8
50 °С	0,5	0,7	0,8	0,9
Коэффициент водостойкости, не менее	0,55	0,70	0,75	0,8
Водонасыщение, % по объему	4...9	4...9	2...6	2...6
Набухание, % по объему, не более	2,5	2	2	1,5

Таблица 8.16

Показатели физико-механических свойств пористых битумоминеральных смесей

Показатель	Нормы для смесей	
	с жидкими вяжущими	с жидкими совместно с минеральными, с вязкими (в том числе эмульгированными), с эмульгированными совместно с минеральными вяжущими
Предел прочности на сжатие, МПа, не менее, при температурах: 20 °С 50 °С	 0,8 Не нормируется	 1,2 0,5
Коэффициент водостойкости, не менее	0,5	0,6
Коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении, не менее	0,4	0,5
Набухание	3	2

Гранулометрический состав битумоминеральных смесей отличается от асфальтобетонных содержанием щебня и минерального порошка. Например, в мелкозернистых битумоминеральных смесях содержание щебня 25...50 %, минерального порошка 8...20 %, тогда как в асфальтобетонных — 20...65 % и 6...12 % соответственно.

Это означает, что в битумоминеральных материалах нет щебеночного каркаса и прочность обеспечивается большим количеством минерального порошка, т.е. повышенным внутренним сцеплением.

Приготовление битумоминеральных смесей ***способом смешения на дороге*** производится следующим образом. Минеральную смесь, выложенную на обочине длинным валиком, поливают жидким битумом, а затем смешивают все компоненты автогрейдером многократными проходами дорожной фрезы.

Невозможность точного дозирования компонентов и примитивный способ перемешивания не позволяют получать смесь требуемой однородности, однако ее физико-механические свойства всегда соответствуют нижним пределам норм (такие свойства обеспечиваются даже при очень больших изменениях гранулометрического состава).

Влажные органоминеральные смеси (ВОМС) (разработаны в Росдорнии) состоят из увлажненных минеральных материалов подобранного гранулометрического состава, активатора или ПАВ и жидкого органического вяжущего.

Они делятся на плотные (уплотняемые катками) с остаточной пористостью 2...5 % и пористые — плотностью 5...12 %, доуплотняемые транспортными средствами после открытия движения.

В качестве крупного заполнителя для ВОМС применяют природные или дробленые гравий, щебень, отходы промышленного производства, содержащие не более 40 % зерен размером 10...40 мм. Допускается применение пород, содержащих глинистые примеси, в которых комков не должно быть больше 5 %.

Песок может быть любой крупности, в том числе мелкий и дюнный. Минеральный порошок должен соответствовать требованиям ГОСТ 16557–78.

В качестве активатора применяют воздушную гашеную известь. В качестве вяжущих для приготовления ВОМС используют тяжелые нефти, гудрон, дорожный деготь, битумы жидкие и разжиженные. Вязкость вяжущих C_{60}^{5} должна быть в пределах 40...120 с.

В составе минеральных смесей, предназначенных для устройства покрытий на дорогах с движением до 1000 авт./сут., нормируется только содержание минерального порошка — 6...12 % зерен мельче 0,071 мм; с движением 1000...3000 авт./сут. дополнительно нормируется содержание щебня (до 40 %). Количество вяжущего в обоих случаях должно составлять 3...5 % и 6...7 %. Количество воды определяется по разнице количества жидкой фазы.

Показатели физико-механических свойств материала из ВОМС должны соответствовать требованиям табл. 8.17.

Таблица 8.17

Показатели физико-механических свойств ВОМС

Свойство	Смесь, приготовленная	
	в лаборатории	на производстве
Остаточная пористость, % по объему, для смесей:		
плотных	2,0...4,9	2,0...4,9
пористых	5,0...12,0	5,0...12,0
Водонасыщание под вакуумом, не более, % по объему, для смесей:		
плотных	5,0	3,0
пористых	12,0	9,0
Набухание, % по объему, не более	0,5	0,5
Предел прочности при сжатии, не менее, при температурах, МПа (кгс/см^2):		
+20 °С	0,6 (6,0)	1,0 (10,0)
+50 °С	0,3 (3,0)	0,5 (5,0)
Предел прочности при раскалывании по образующей при температуре 0 °С, в пределах, МПа (кгс/см^2)	0,5...2,5 (5...25)	0,8...4,0 (8...40)
Коэффициент водостойкости (на 14-е сутки), не менее	0,7	0,8
Слеживаемость, не более, число ударов	5	5

Примечание. Слеживаемость определяют, если смесь готовят впрок.

ВОМС готовят в лопастных мешалках, укладывают асфальтоукладчиками или автогрейдером, уплотняют катками, преимущественно пневмоколесными.

Влажные органоминеральные или подобные смеси, уложенные и уплотненные в слое покрытия, приобретают прочность после высыхания.

Все эти смеси имеют ограниченное применение, однако при строительстве местных дорог их значение весьма существенно.

В число битумоминеральных материалов входят ***грунты, укрепленные органическими вяжущими*** (битумами, битумными эмульсиями, дегтями, синтетическими смолами). Указанные вяжущие применяют для укрепления следующих видов грунтов:

- песчано-гравийных и песчано-щебеночных оптимального гранулометрического состава;
- песков;
- супесей;
- суглинков легких или улучшенных гранулометрическими добавками.

Укрепленные органическими вяжущими грунты обладают упруго-вязкопластичными свойствами и достаточной водо- и морозостойкостью.

При укреплении грунтов органическими вяжущими формируется *коагуляционная структура*, возникающая при контакте агрегатов частиц между собой через тонкие прослойки вяжущего. Коагуляционные структуры отличаются от кристаллизационных (как у цементогрунтов) следующими свойствами:

- относительно малой прочностью;
- ярко выраженной пластичностью;
- тиксотропностью.

При укреплении грунтов синтетическими смолами (например, карбамидной) в результате хемосорбционных связей формируется *конденсационная структура*. Эта структура отличается высокой прочностью, хрупкостью, упругостью. Она не способна к остаточным деформациям и характеризуется полным отсутствием тиксотропных свойств.

Расход жидкого битума, каменноугольного дегтя при укреплении различных грунтов колеблется от 3...5 до 6...13 % от массы грунта.

Для получения более прочного укрепленного грунта по сравнению с грунтом, укрепленным жидкими битумами или дегтями, целесообразно использовать ***битумные эмульсии***. Их применение позволяет использовать вязкие битумы, обрабатывать влажные грунты при температуре воздуха до 5 °С.

Такие укрепленные грунты дают возможность устраивать дорожные покрытия из грунтов на местных дорогах низших категорий (VI-а, VI-б).

Укрепление грунтов выполняется с использованием в качестве ведущей машины дорожной фрезы, однопроходной грунтосмесительной машины, стационарной или передвижной смесительной установки.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Приведите общую схему классификации битумоминеральных материалов.

2. Приведите классификацию асфальтобетонных смесей.

3. Опишите особенности щебеночно-мастичного асфальтобетона его эффективность.

4. Какие **материалы применяются для асфальтобетонных смесей?**

5. Опишите способы улучшения свойств минеральных заполнителей (трибоактивация песка, применение реагентных методов).

6. Опишите **способы улучшения свойств битумов для асфальтобетона:** сущность ультразвукового, электромагнитного, механохимического, электрогидравлического способов.

7. Нарисуйте схематическую модель структуры асфальтобетона.

8. Нарисуйте **схемы структуры асфальтобетона (по насыщенности крупного заполнителя).**

9. Нарисуйте структуру битума в асфальтобетоне.

10. Как распределяется битум в структуре асфальтобетона?

11. Опишите взаимодействие битума с минеральными материалами.

12. Нарисуйте схему классификации свойств асфальтобетона.

13. Что собой представляют технологические свойства асфальтобетона?

14. Как измеряются **физико-механические свойства асфальтобетона** (прочность, водо- и морозостойкость)?

15. Дайте определения реологических свойств асфальтобетона (ползучесть, модуль упругости, релаксация напряжения).

16. Какой **документ нормирует свойства горячих, теплых и холодных смесей и асфальтобетонов?**

17. Опишите последовательность расчета состава асфальтобетона.

18. Опишите технологию приготовления асфальтобетонных смесей (стандартный метод).

19. В чем особенности производства асфальтобетонной смеси по беспыльной технологии?

20. В чем особенности производства асфальтобетонной смеси по двухступенчатой технологии?

21. В чем состоит контроль качества асфальтобетона?

22. В чем преимущества применения штучных изделий из асфальтобетонных смесей?

23. Опишите схему регенерации старого асфальтобетона.

24. Расскажите о битумоминеральных материалах.

9 ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ В ДОРОЖНОЙ ОТРАСЛИ

9.1. Общие сведения о полимерах и пластмассах

Наряду с органическими и минеральными вяжущими, каменными и другими материалами, при строительстве, ремонте и содержании дорог используют материалы и изделия на основе пластмасс — полимерные материалы.

Такие материалы применяют:

- для укрепления грунтов в дорожных одеждах;
- в качестве модифицирующих добавок к битумам, асфальто- и цементобетонам;
- в качестве отделочных, гидроизоляционных и звукоизоляционных материалов;
- в качестве твердых и пленочных изделий.

Пластмассы являются хорошими заменителями таких дефицитных материалов, как металлы, древесина, олифа и др. Они часто наиболее предпочтительны для работы в дорожных конструкциях, работающих в экстремальных условиях (частые переходы через нулевую температуру, при очень низких и высоких температурах, при высокой влажности, в агрессивных средах).

Применение полимерных материалов способствует улучшению условий и производительности труда рабочих, дальнейшей индустриализации дорожного строительства (капсулирование битума, гранулирование асфальтовяжущего вещества для производства асфальтобетонных смесей).

9.1.1. Полимеры

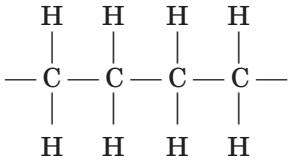
Полимеры — высокомолекулярные вещества, молекулы которых состоят из огромного количества молекул низкомолекулярных соединений (мономеров), соединенных друг с другом силами ковалентных связей в макромолекулы.

Макромолекулы во много тысяч раз превышают размеры обычных молекул. Так, молекула воды состоит из трех атомов, а ее молекулярная масса равна 18 ед.; молекула силикальцита состоит из пяти атомов, а ее молекулярная масса равна 100 ед. Молекулы полимеров содержат сотни тысяч атомов, а их молекулярная масса достигает десятков и сотен тысяч единиц и более. Например, молекула целлюлозы (природный полимер) построена из 1 200 000 атомов с молекулярной массой 300 000 ед., у искусственного полимера полиэтилена молекулярная масса колеблется в пределах от 10 000 до 40 000 ед.

Полимеры разделяют на органические и неорганические. Главным отличием органических полимеров является наличие в их молекулах атомов углерода, которых в молекулах неорганических полимеров нет. В строительстве наибольшее распространение получили искусственные органические полимеры.

В большинстве случаев органические полимеры содержат многократно повторяющиеся структурные элементарные звенья — *мономеры*.

Основная цепь у макромолекул полимеров обычно состоит из атомов углерода (карбоцепные полимеры). Например, полиэтилен $(—CH_2—CH_2—)_n$:



Индекс n обозначает число повторяющихся звеньев мономеров, входящих в состав полимера:

$$n = \frac{M}{m},$$

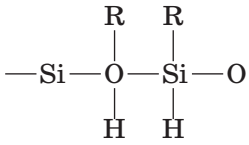
где M — молекулярная масса полимера; m — то же мономера.

Иногда цепь полимера состоит из атомов углерода, чередующихся с атомами других элементов: кислорода, хлора, серы, азота, фосфора. Такие полимеры называются гетероцепными (ненасыщенные полиэфиры, полиамиды).

Ненасыщенные полиэфиры выпускаются промышленностью в виде полиэфирных смол, используемых при производстве стеклопластиков, лаков, клеев.

Полиамиды — синтетические полимеры, содержащие повторяющиеся группы (—CO—**NH—**) **в основной цепи макро**молекулы. Применяются при производстве пленок, синтетических волокон, клеев.

В основную цепь макромолекулы полимера могут включаться атомы кремния, алюминия, титана, никеля, отсутствующие в природных соединениях. Такие полимеры называются *элементоорганическими*. Так, например, соединения типа



имеют в макромолекуле кремний-кислородные связи, именуемые силоксановыми.

По строению молекул органические полимеры могут быть линейными, разветвленными и сетчатыми (трехмерными). При *линейном* строении все молекулы вытянуты в виде цепей, в которых молекулы мономера, являющиеся исходным низкомолекулярным соединением, химически связаны между собой. *Разветвленные* макромолекулы характеризуются наличием мономерных звеньев, ответвленных от основной цепи полимера. *Сетчатые* (*пространственные*) макромолекулы характеризуются химической «сшивкой» отдельных линейных

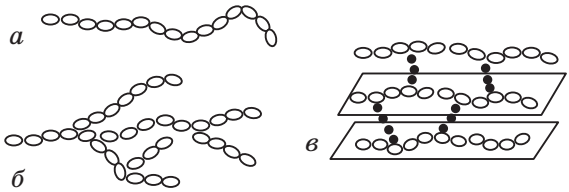


Рис. 9.1. Строение молекул полимеров:
а — линейная структура; *б* — разветвленная структура; *в* — структура пространственного полимера

или разветвленных цепей полимера поперечными связями (рис. 9.1).

Органические полимеры в твердом состоянии обычно имеют аморфную структуру. Однако некоторые полимеры в твердом состоянии характеризуются кристаллической или аморфно-кристаллической структурой.

Основными видами сырья для производства полимеров служат природные и нефтяные газы, аммиак, каменный уголь, древесина и др.

В зависимости от способа получения полимеры разделяют на две группы: полимеризационные (термопласты) и поликонденсационные (реактопласты).

Полимеризационные полимеры получают полимеризацией исходных мономеров путем соединения элементарных звеньев мономера в длинные цепи. Поскольку при полимеризации мономеров атомы и их группировки не отщепляются, то побочных продуктов в реакциях не образуется, а химический состав мономера и полимера остается одинаковым. В полимеризации могут участвовать два и более мономера, тогда ее называют сополимеризацией, а продукт — сополимером.

При *поликонденсации* протекают более сложные химические реакции, в результате которых образуется не только основной продукт, но и побочные соединения (вода, спирт и др.), так что химический состав получаемого сополимера всегда будет отличаться от химического состава исходных продуктов поликонденсации.

По мере протекания процессов полимеризации и поликонденсации растет число атомов в образуемых макромолекулах и молекулярная масса формирующихся полимеров.

Все синтетические высокомолекулярные соединения, полученные полимеризацией или поликонденсацией (за исключением эфиров целлюлозы и каучуков), принято называть ***синтетическими смолами***.

По отношению к нагреванию синтетические смолы делят на термопластичные (термопласты) и термореактивные (реактопласты).

Термопластичными смолами (*термопластами*) называют смолы, которые при нагревании размягчаются с последующим плавлением, а при охлаждении снова затвердевают. Такое свойство термопластов обусловлено линейным строением их макромолекул.

Аморфные термопластичные полимеры в зависимости от температуры могут находиться в трех физических состояниях: стеклообразном, высокоэластичном и вязкотекучем. Переходы от одного состояния в другое хорошо иллюстрируются термомеханической кривой (рис. 9.2).

На начальном участке (I) до *температуры стеклования* $T_с$ деформации от приложенной нагрузки незначительны и мало изменяются с повышением температуры. Однако после дости-

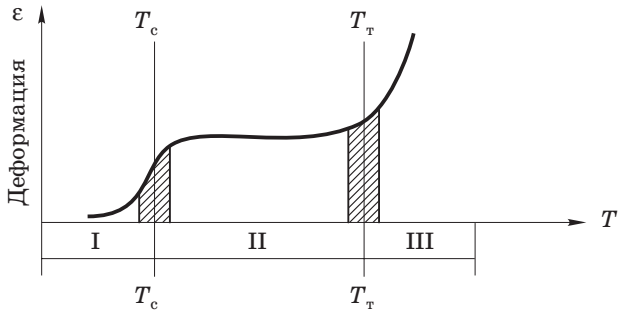


Рис. 9.2. Классическая форма термомеханической кривой (*$T_с$* — температура стеклования; *$T_т$* — температура текучести)

жения температуры $T_с$ деформации резко возрастают, а затем стабилизируются и остаются примерно одинаковыми до *температуры текучести* $T_т$ (участок II). **При дальнейшем повышении** температуры снова наблюдается интенсивное увеличение деформаций, что приводит к разрушению полимеров (участок III).

У термопластичных смол есть преимущества и недостатки.

Преимущества: небольшая плотность (1...2 г/см^3), низкая теплопроводность, высокая химическая стойкость. Большинство термопластичных смол устойчивы к воздействию кислот, щелочей, воды и водных растворов различных солей.

Недостатки: низкая теплостойкость, малый модуль упругости, хрупкость при температуре ниже температуры хрупкости. Большая ползучесть термопластичных полимеров ограничивает их применение в строительстве в качестве конструкционных материалов.

К термопластичным смолам относятся:

- полиэтилен $(—CH_2—CH_2—)_n$;
- полипропилен $(—CH_2—CH—CH_3—)_n$;
- полиизобутилен $(—CH_2—C(CH_3)_2—)_n$;
- поливинилхлорид $(—CH_2—CHCl—)_n$;
- полистирол $(—CH_2—CHC_6H_5)_2—)_n$;
- полиамидные смолы.

Физико-механические свойства некоторых термопластичных смол приведены в табл. 9.1.

Термореактивные смолы (*реактопласты*) при нагревании способны перейти в пластическое состояние только один раз. При этом при повышенных температурах происходит «сшивка» линейных молекул в поперечном направлении прочными химическими связями — образуется сетчатая структура. С образованием такой структуры свойства реактопластов существенно изменяются: они теряют способность растворяться в растворителях и переходить при повторном нагревании в пластическое состояние, т.е. размягчаться.

Таблица 9.1

Физико-механические свойства термопластичных смол

Смола	Средняя плотность, кг/м³	Теплостойкость по Мартенсу, °С	Морозостойкость, °С	Электрическая прочность, кВт/мм	Предел прочности, кгс/см² (МПа)			Относительное удлинение при разрыве, %	Ударная вязкость, Дж/м²	Твердость по Бринеллю
					на растяжение	на сжатие	на изгиб			
Полиэтилен высокого давления	925	60	–70	45...60	130...160 (13...16)	145 (145)	170 (17)	150...600	Не разрушаются	13
Полипропилен	910	100...110	–35	30...32	320 (32)	600...700 (60...70)	800...1100 (80...110)	До 650		16
Полистирол	50	75...80	–25	20...40	350...400 (35...40)	1000 (100)	600...850 (60...85)	1...4	5...15	5...20
Полиамиды	1140	50...55	–45	30	600...650 (60...65)	700...900 (70...90)	700...900 (70...90)	200	100...160	10...12

Термореактивные смолы характеризуются большой твердостью, теплостойкостью и незначительными деформациями под действием постоянной статической нагрузки.

Чем более «густой» является пространственная сетка, т.е. чем больше поперечных «сшивок» макромолекул в единице объема, тем выше жесткость и конечный модуль упругости и меньше вероятность проявления ползучести от внешних нагрузок.

Существуют следующие виды термореактивных смол:

- фенолоформальдегидные;
- карбамидные;
- эпоксидные;
- полиэфирные;
- кремнийорганические.

Физико-механические свойства некоторых термореактивных смол приведены в табл. 9.2.

Основными ***техническими характеристиками*** полимеров являются:

- температуры размягчения, стеклования, текучести;
- механические свойства (прочность, деформативность, поверхностная твердость);
- химические свойства (атмосферостойкость, сопротивляемость деструкции в химически агрессивных средах).

Каждое из этих свойств определяется по стандартным методам в лабораторных практикумах.

Полимеры, с позиций строительных материалов, обладают рядом положительных свойств и недостатков.

Положительные свойства: малая плотность; низкая теплопроводность; высокие химическая и атмосферостойкость; высокая прочность.

К недостаткам можно отнести: низкую теплостойкость; малую поверхностную твердость; невысокий модуль упругости; значительную ползучесть; склонность к старению; высокую стоимость.

Таблица 9.2

Физико-механические свойства термореактивных смол

Смола	Плотность, г/см^3	Теплостойкость по Мартенсу, °С	Электрическая прочность, кВт/мм	Предел прочности, кгс/см^2 (МПа)			Удельная ударная вязкость, Дж/м^2	Удлинение, %
				на растяжение	на сжатие	на изгиб		
Фенолоформальдегидные (резольные)	1,25	80…110	10…20	250…500 (20…50)	700…1500 (70…150)	40…1000 (4…100)	—	13
Мочевиноформальдегидные (карбамидные)	1,45	70…100	12…16	120…500 (12…50)	800…1100 (80…110)	300…600 (30…60)	—	16
Эпоксидные	1,2	60…140	11…30	400…800 (40…80)	700…1600 (70…160)	600…1300 (60…130)	10…25	2,5…8
Полисилоксановые (кремнийорганические)	1,6…2,1	280…350	15…20	—	4000…6000 (400…600)	—	—	—

9.1.2. Пластмассы

Пластическими массами (пластмассами) называют композиционные материалы, в которых в качестве связующего применяются полимеры — смолообразные синтетические высокомолекулярные вещества.

Кроме связующего, в состав пластмасс входят:

- наполнители;
- отвердители;
- пластификаторы;
- пигменты;
- порообразователи.

Первая пластмасса *эбонит* была изготовлена в 1843 г. на основе вулканизированного натурального каучука и применялась в качестве электроизоляционного материала. В 1887 г. на основе модифицированной целлюлозы был получен *целлулоид*. В результате исследований Л. Бэкеленда и Г.С. Петрова в начале XX в. были получены первые синтетические полимеры *фенолоальдегиды* и на их основе изготовлены *фенопласты*. В 1930—1940-е гг. промышленность СССР начала выпускать *поливинилхлорид, полистирол, полиэтилен, полиамиды* и др. В теоретические исследования и разработку технологических процессов производства синтетических полимеров внесли большой вклад С.В. Лебедев, Н.Н. Семенов, С.С. Медведев, И.П. Лосев и др.

Положительные свойства пластмасс. Средняя плотность пластмасс составляет от 15 до 2200 кг/м^3. Например, полиэфирные стеклопластики легче алюминия в 2 раза, стали — в 5 раз; пенопласты легче пенобетона в 20–40 раз. Их применение позволяет снизить массу конструкций. Из пластмасс можно получить материалы с высокой механической прочностью. Так, стеклопластик СВАМ (стекловолокнистый анизотропный материал) имеет предел прочности на сжатие и растяжение до 450 МПа.

Теплопроводность плотных пластмасс составляет 0,2...0,6, пористых — 0,023...0,045 Вт/(м·°С). Применение пористых пластмасс позволяет изготавливать легкие конструкции.

Высокая коррозионная стойкость пластмасс к воздействию кислот, щелочей, солей позволяет применять их в химической промышленности, для изготовления канализационных труб.

Отдельные пластмассы имеют высокую светопрозрачность. Так, светопрозрачность полиметилметакрилатных стекол составляет 83...94 %.

Недостатки пластмасс: способность к старению; низкая теплостойкость; токсичность (что ограничивает их применение).

Процесс старения в пластмассах протекает быстрее, чем в минеральных материалах. Происходит потеря прочности, эластичности, повышение хрупкости. Замедляют этот процесс введением стабилизаторов.

Теплостойкость пластмасс составляет в основном 80...160 °С. Кремнийорганические смолы сохраняют свойства от −100 °С до +300 °С.

Если химические процессы при изготовлении полимеров не завершены, пластмассы могут быть токсичными. Применение их необходимо согласовывать с санитарным надзором.

Ниже кратко рассматриваются компоненты пластмасс и их свойства.

Наполнители. Наполнителями пластических масс служат различные органические и минеральные материалы. Применение наполнителей позволяет не только снизить стоимость материалов из пластмасс, поскольку наполнители всегда дешевле, чем связующие вещества (например, синтетические смолы), но и получить материалы требуемых физико-механических свойств.

В качестве *органических наполнителей* пластических масс применяют древесную муку, древесную стружку, сульфитную целлюлозу, бумагу, хлопчатобумажные ткани, древесный шпон.

Из *минеральных наполнителей* наиболее широко используют асбестовое волокно, слюду, стекловолокно, графит, сажу, металлический порошок, кварцевую муку и др.

Рассмотрим некоторые из наполнителей и их влияние на физико-механические свойства пластмассовых материалов и изделий.

Древесная мука — это тонкоизмельченная древесина, получаемая путем размалывания в специальных мельницах отходов деревообработки (опилок и стружек). К древесной муке, применяемой в качестве наполнителя пластических масс, предъявляют требования по тонкости помола и влажности. Древесную муку вводят в состав многих *фенопластов*, а также *линолеума, линкруста* и других пластмассовых материалов.

Древесную стружку толщиной 0,1...0,6 мм в виде узких и длинных лент из древесины любых пород, но лучше с объемной массой не более 0,5 г/см^3, получают как отход при обработке древесины на деревообрабатывающих станках или специальным изготовлением.

Сульфитную целлюлозу получают из древесины путем ее обработки раствором бисульфита кальция $Ca(HSO_3)_2$, т.е. так называемым сульфитным способом варки.

Асбестом называют минерал серпентин и его разновидности (хризотил, хризотил-асбест и др.). Их слоистая структура предопределяет способность расщепляться на тончайшие гибкие и прочные волокна. Химический состав серпентина выражается формулой $[Mg_3(OH)_4Si_2O_5]$.

Наибольшее промышленное значение имеет хризотил-асбест (95 % всей мировой добычи асбеста).

Стекловолокно получают из расплавленного стекла. В зависимости от диаметра и длины волокон стекловолокно подразделяют на *текстильное* (диаметр волокон 3...10 мкм) и *теплоизоляционное* (3...30 мкм). Теплоизоляционное волокно называют также *стекловойлоком* или *стеклянной ватой*. По длине текстильное и теплоизоляционное волокно подразделяется на *непрерывное* (с длиной волокон более 50 см) и *штапельное* (с длиной волокон менее 50 см).

Стеклянное волокно получают методом, основанным на вытягивании нити из расплавленной стеклянной массы.

Кварцевая мука представляет собой тонкоизмельченный кварцевый песок. Ее получают размалыванием в специальных мельницах.

В табл. 9.3 рассмотрено влияние отдельных наполнителей на свойства пластических масс на основе фенолоформальдегидных смол.

Таблица 9.3

Влияние отдельных наполнителей на свойства пластических масс на основе фенолоформальдегидных смол

Наполнитель	Влияние наполнителей на свойства пластических масс
Древесная мука, древесные опилки и стружки	Незначительно повышают прочность и ударную вязкость, но придают повышенную гигроскопичность и понижают теплостойкость
Сульфитная целлюлоза	Существенно повышает прочность на растяжение
Асбест	Увеличивает теплостойкость, прочность, ударную вязкость и фрикционные свойства (возрастает коэффициент трения)
Стекловолокно	Улучшает механические свойства и увеличивает теплостойкость
Кварцевая мука	Повышает твердость, кислотостойкость и теплостойкость

Пластификаторы. Пластичность синтетических смол и пластмасс на их основе можно существенно повысить путем введения в их состав пластификаторов. Механизм пластификации смол заключается в том, что пластифицирующие вещества как бы разъединяют макромолекулы полимера, уменьшая межмолекулярное взаимодействие между ними и облегчая процесс скольжения макромолекул относительно друг друга. Иными словами, пластификаторы переводят полимер в набухшее стабильно сохраняющееся состояние, что повышает его пластичность. Повышая пластичность и морозостойкость пластмасс (снижается температура перехода материала в хрупкое состояние), они уменьшают их прочность на растяжение и увеличивают ползучесть.

В качестве пластификаторов применяют различные низкомолекулярные органические соединения (например, диэтилфталат).

Можно использовать и высокомолекулярные органические соединения, если они совмещаются с пластифицируемыми

смолами (например, синтетический каучук). Такие пластификаторы повышают не только пластичность, но и эластичность полимерных материалов.

Все пластификаторы являются нелетучими жидкостями и вводятся в состав пластических масс в количестве 10...100 % от массы смолы в зависимости от требуемой пластичности.

Стабилизаторы. В процессе эксплуатации у некоторых полимерных материалов наблюдается изменение физико-механических свойств: снижается прочность, эластичность, повышается хрупкость, газопроницаемость и т.д. Подобное изменение свойств полимерных материалов называется процессом ***старения*** синтетических смол.

Некоторые синтетические смолы практически не стареют (например, политетрафторэтилен), другие без введения в их состав специальных веществ (стабилизаторов) подвергаются быстрому старению, (например, полистирол).

Физико-химическая природа старения синтетических смол еще недостаточно изучена. Одной из причин старения является наличие в синтетических смолах ненасыщенных углеводородов. Процесс старения вызывается действием кислорода воздуха, света, тепла и т.д. и сопровождается изменением строения полимеров. Так, например, под действием кислорода воздуха линейная структура макромолекул некоторых термопластичных смол преобразуется в сетчатую трехмерную структуру, что вызывает уменьшение их эластичности и повышение хрупкости.

Полимерные связующие (смолы) и их свойства рассмотрены в 9.1.1.

Классификация пластических масс. По виду связующих веществ все пластические массы подразделяются на четыре класса:

- на основе синтетических смол — продуктов полимеризации;
- на основе синтетических смол — продуктов поликонденсации;
- на основе химических модифицированных природных полимеров;
- на основе нефтяных битумов.

Пластические массы могут состоять только из связующего вещества (без наполнителя) или иметь более сложную структуру, обусловленную наличием в составе пластмасс различных наполнителей.

По структуре пластмассы также делят на четыре класса:

- ненаполненные пластмассы (без наполнителя); пластмассы этого класса, кроме смолы, могут содержать красители, стабилизаторы, пластификаторы;
- газонаполненные пластмассы — пористые синтетические смолы (пено- и поропласты);
- наполненные пластмассы, в состав которых входят различные наполнители, по виду которых они подразделяются на пластмассы с порошкообразным наполнителем и пластмассы с коротковолнистым наполнителем;

пластические массы составных структур.

Применение полимерных материалов в строительстве. На практике хорошо себя зарекомендовали около 50 видов пластических масс (из них 36 термопластов и 14 реактопластов). В каждом виде полимеров в среднем содержится до 50 типов модификаций, хотя ассортимент изделий из пластмасс превышает 300 тысяч.

Все производимые промышленностью полимеры можно разделить на три группы: *крупнотоннажные* (полиэтилен низкой и высокой плотности, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид), *среднетоннажные* (на основе фенолоформальдегидных, мочевино- и меламиноформальдегидных, полиэфирных, эпоксидных, полиуретановых и алкидных полимеров), *малотоннажные* полимеры со специфическими свойствами, например с высоким модулем упругости (полиэтиленоксибензонат и др.).

Полимерные материалы — материалы XXI в. В настоящее время нельзя назвать область деятельности человека, где бы они не применялись. Синтетические полимерные материалы, применяемые или рекомендуемые для применения в дорожном и аэродромном строительстве, целесообразно классифицировать по функциональному назначению и виду исходного материала или изделия (рис. 9.3).

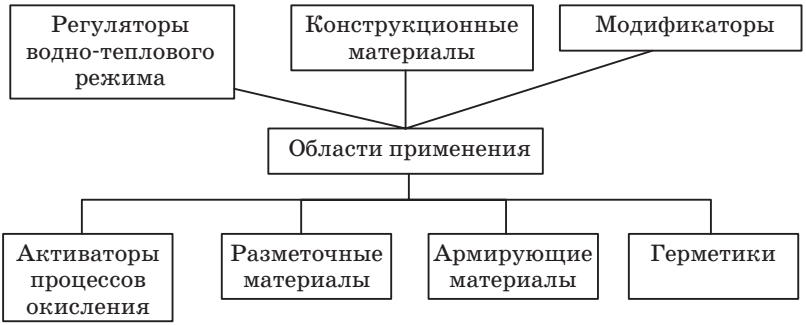


Рис. 9.3. Применение полимерных материалов в дорожном и аэродромном строительстве

Области применения отдельных синтетических полимеров в строительстве приведены в табл. 9.4.

Таблица 9.4

Применение некоторых полимеров в строительстве

Полимер	Вид полимера (изделия)	Область применения
Полимеризационные полимеры		
Полиэтилен	Пленочный	Уход за свежеуложенным цементобетоном, капилляропрерывающие слои
	Трубы	Дренаж
Полипропилен	Пленочный	Дренаж
	Волокна	Армирование композиционных материалов
	Гранулы	Улучшение свойств разметки дорог, теплоизоляционных материалов
Поливинилхлорид	Трубы	Дренаж
	Гранулы	Теплоизоляция
	Пленочный	Капилляропрерывающие слои
	Волокна	Армирование композиционных материалов
	Мастики	Герметизация стыков
	Смола	Улучшение свойств цементобетонов

Продолжение табл. 9.4

Полимер	Вид полимера (изделия)	Область применения
Тэтрафторэтилен (фторопласт)	Рулоны Сетки	Надвижка конструкций мостов Армирование конструкционных слоев
Полистирол	Плиты	Теплоизоляционная пропитка цементобетонов
Поливинилацетилен (лак этиноль)	Раствор в ксилоле и др.	Уход за свежеуложенным бетоном
Дивинилстирол	Гранулы, латекс Раствор в дизельном топливе Старая резина	Улучшение асфальтобетона Улучшение битумных эмульсий Улучшение битумов
Поливинилацетат	Жидкость (мономер)	Пропитка бетонов
Тиокол	Мастика	Изготовление герметиков
Поликонденсационные полимеры		
Фенольные	Смолы	Полимербетоны, укрепление грунтов, улучшение битумных эмульсий
Карбамидные	Смолы Мипора	То же, а также клеи Предохранение грунтов от промерзания
Фурановые (мономеры ФА, ФАМ)	Смолы	Пропитка цементных бетонов, полимербетоны, улучшение асфальтобетонов
Полиэфирные (лавсан)	Волокна Сетки	Армирование композиционных материалов
Полиуретановые	Смолы, плиты	Изготовление герметиков, теплоизоляция
Полиамидные (капрон)	Волокна	Армирование композиционных материалов

Окончание табл. 9.4

Полимер	Вид полимера (изделия)	Область применения
Эпоксидные	Смолы	Полимербетоны, клеи, улучшение свойств цементных бетонов (водорастворимые смолы), улучшение битумов, изготовление герметиков
	Эмали	Разметка дорог
Кремнийорганические	Смолы	Улучшение свойств цементных бетонов, уход за бетоном, улучшение эмалей
Аминоацетон-формальдегидные	Смолы	Повышение физико-механических свойств бетонов

9.2. Свойства пластмасс как материалов, пригодных для использования при строительстве и ремонте дорог

Плотность. У плотных видов пластиков плотность, в зависимости от их природы и состава, изменяется от 0,91 до 2,4 г/см^3 (полиизобутилен — 0,91 г/см^3; полиэтилен — 0,94 г/см^3; поливинилхлорид — 1,40 г/см^3; фторопласты — 2,3 г/см^3; пластбетоны — 2,4 г/см^3). Таким образом, плотные пластики в 2–3 раза легче алюминия и в 4–6 раз легче большинства черных и цветных металлов.

Плотность газонаполненных пластиков (пенополистирола, пенополивинилхлорида, пенополиуретана и некоторых других) составляет всего 0,01...0,22 г/см^3. Наиболее легкие из них в 15...20 раз легче пробки.

Даже частичная замена металлов и каменных материалов пластмассами позволяет значительно снизить вес сооружения.

Химическая стойкость. Под химической стойкостью понимают стойкость пластмасс к кислотам, щелочам, растворам солей, воде, а иногда и к органическим растворителям.

Высокой стойкостью к воздействию кислот, растворов солей, воды обладают фторопласты (пластмассы на основе по-

литетрафторэтилена), полиэтилен, полиизобутилен, полистирол, поливинилхлорид. Фторопласты не растворяются даже в смеси азотной и серной кислот.

Высокая химическая стойкость многих пластических масс позволяет применять их в элементах дорожных конструкций, подверженных действию агрессивных вод.

Теплопроводность. Пластмассы плохо проводят тепло. Коэффициент теплопроводности плотных видов их — 0,2...0,7 ккал/(м·ч·°С), т.е. меньше коэффициента теплопроводности тяжелого цементного бетона и стали соответственно в 2 и 85 раз. Коэффициент теплопроводности легчайших газонаполненных пластиков (мипоры, пенополистирола) составляет всего около 0,026...0,03 ккал/(м·ч·°С).

Низкая теплопроводность пластмасс, особенно пенопластов, позволяет эффективно применять их в качестве теплоизолирующих материалов при строительстве автомобильных дорог.

Теплостойкость, т.е. способность материала сохранять свои свойства при нагревании, у пластмасс относительно низкая. Максимально допустимая температура эксплуатации (предел теплостойкости) большинства пластмасс изменяется от 70 до 250 °С. Для винипласта она равна 70 °С, для фторопласта — 250 °С. Более высокий предел теплостойкости (до 400 °С) у пластмасс, изготовляемых на основе кремнийорганических полимеров.

Хотя теплостойкость большинства пластмасс ниже теплостойкости цементного бетона, природных каменных материалов и других, она все же достаточна для того, чтобы пластмассы могли быть использованы практически в любой дорожной конструкции.

Хладостойкость — способность материала сохранять свои свойства при отрицательных температурах — у ряда пластмасс недостаточна. Предел хладостойкости (температура, при которой пластмасса становится хрупкой и легко разрушается при ударе и изломе) поливинилхлоридных материалов изменяется от −15 до −50 °С; для полиэтилена он равен −60 °С, для полиизобутилена −78 °С. Поэтому некоторые виды пластмасс

не могут быть применены при строительстве дорог в условиях сурового климата.

Коэффициент термического расширения пластмасс довольно высок и колеблется в пределах $(25...120)\cdot10^{-6}$, т.е. в 2,5–10 раз выше, чем у стали. Большой коэффициент термического расширения может служить причиной возникновения внутренних напряжений в материале при резких изменениях температур и появления трещин.

Это свойство необходимо учитывать при изготовлении мастик для деформационных швов в дорожных и мостовых конструкциях.

Адгезия. Многие синтетические полимеры обладают высокой адгезией (прилипаемостью) к металлам, природному камню, бетону, керамике, стеклу, пластмассам и т.д. Благодаря этому их широко применяют для изготовления клеев, способных отверждаться в горячем и в холодном состояниях (на холоду). Адгезия к металлу эпоксидного клея, оцениваемая пределом прочности при отрыве, составляет 300...400 кг/см^2. Высокими показателями адгезионных свойств обладают также клеи на основе кремнийорганических, модифицированных фенолоформальдегидных смол.

Синтетические полимеры могут также использоваться как добавки при модификации битумов и получении материалов для ремонта дорожных и мостовых конструкций.

Прочность. Многие пластмассы отличаются высокими показателями механической прочности. Так, прочность на растяжение отдельных видов стеклопластиков может достигать 9000 кг/см^2, т.е. она выше, чем прочность обычной строительной стали Ст3. Пластические массы характеризуются высокими значениями коэффициента конструктивного качества (отношения предела прочности материала к его средней плотности). Для стеклопластика СВАМ его значение в 110 раз выше, чем для кирпичной кладки.

Высокая прочность пластмасс является важной предпосылкой для более широкого их использования в дорожном строительстве в качестве конструкционных материалов.

Сопротивление истиранию. Отдельные разновидности пластмасс, и прежде всего наполненные твердыми неорганиче-

скими порошками, по сопротивлению истирающим усилиям не уступают граниту. Это позволяет широко использовать их для устройства дорожных покрытий.

Ползучесть. Пластмассы обладают повышенной ползучестью — медленно развивающимся пластическим течением под нагрузкой. Даже жесткие виды наполненных пластмасс подвержены ползучести в гораздо большей степени, чем цементные бетоны, металлы, керамические и другие материалы. Повышенная ползучесть пластмасс является сдерживающим фактором на пути их более широкого использования в несущих конструкциях.

9.3. Полимерные материалы для гидрофобизации и укрепления грунтов

Большинство материалов, применяемых в дорожном строительстве, гидрофильны. С изменением их влажности меняются и их физико-механические свойства. Особенно резкое изменение свойств происходит у грунтов. Это часто служит причиной осложнений, обусловливающих излишние затраты средств, труда и времени при их использовании в качестве материалов для устройства земляного полотна и других инженерных сооружений.

Если частицам грунта придать гидрофобность, то его свойства при увлажнении изменяются в гораздо меньшей степени.

В настоящее время применение синтетических полимеров для гидрофобизации грунтов обосновано теоретически. Теория гидрофобизации основывается на принципах физико-химической механики дисперсных систем, основоположником которой является советский ученый академик П.А. Ребиндер.

Основной причиной гидрофильности грунтов считают наличие на поверхности минералов нескомпенсированных связей, т.е. энергетически активных центров, представленных в грунтах главным образом нескомпенсированными атомами кислорода и гидроксильными группами. Структурные элементы воды взаимодействуют с нескомпенсированными атомами

поверхности зерен грунта, образуя первоначально сорбированный слой воды, который затем утолщается в зависимости от величины зарядов поверхности и рода обменных катионов.

Для того чтобы грунт приобрел гидрофобные свойства, необходимо уравновесить энергетически активные центры на поверхности его зерен. Эту задачу можно решить, применив ПАВ или некоторые добавки полимеров.

9.3.1. Применение ПАВ для гидрофобизации грунтов

Применение *катионактивных ПАВ* — уравновешивание зарядов органическими полярными катионами (их получают растворением в воде солей аминов) — наиболее рациональный путь снижения гидрофильности грунта. Некоторые из этих ПАВ способны вытеснять воду из заранее занимаемых ею позиций, необратимо замещать обменные катионы грунта и коагулировать глинисто-коллоидные частицы.

Молекулы *анионактивных ПАВ* притягиваются только положительно заряженными центрами и отталкиваются от отрицательно заряженных. Уравновешивание энергетически активной системы органически полярными анионами особенно рационально для грунтов карбонатных разновидностей.

Применение в качестве гидрофобизаторов органических полярных молекул основано главным образом на адсорбции их энергетически активными центрами поверхности зерен и удержании силами Ван-дер-Ваальса. Этому процессу благоприятствует возрастание заряда адсорбента, что может быть достигнуто методом трибоактивации грунтов.

Поскольку грунт представляет собой сложную полиминеральную систему, придание ему хорошо выраженных гидрофобных свойств связано с большими трудностями. Но даже неполная гидрофобизация приводит к коренным изменениям физико-механических свойств грунта: уменьшается сорбция паров воды грунтом, водопоглощаемость и набухание, полностью устраняется капиллярное поднятие, уменьшается фильтрация при малых напорах и др.

Роль вводимых в обрабатываемый материал (это относится прежде всего к грунтам) полимеров редко ограничивается

Рис. 9.4. Схема взаимодействия полимера с грунтом: *а* — без участия частиц грунта в образовании структуры; *б* — с включением частиц грунта в структурную сетку; *1* — полимерные цепи; *2* — частицы грунта и их микроагрегаты

только гидрофобизацией поверхностей его зерен. Вторая, не менее важная роль, которую должен играть полимер, заключается в необходимой прочности грунта путем связывания его частиц в единое целое. При малых расходах полимера максимальная прочность грунта обеспечивается:

1) **обволакиванием частиц грунта и механическим пронизыванием** его объема (рис. 9.4, *а*);

2) **сращиванием (сшивкой) полимерных цепей непосредственно** между частицами грунта и их прочными микроагрегатами за счет проявления ионных или ковалентных связей (рис. 9.4, *б*).

В последнем случае частицы грунта образуют с полимером единую пространственную сетку. При такой связи грунта с полимером сокращается средняя длина цепей последнего между фиксированными точками, что, в свою очередь, влечет за собой сокращение расхода полимера и улучшение механических свойств структуры.

Таким образом, второй принцип является идеальным с точки зрения наиболее эффективного использования полимера для укрепления грунтов.

9.3.2. Применение полимеров для укрепления грунтов

При выборе полимеров для укрепления грунтов следует учитывать ряд факторов, определяющих эффективность их применения. В.М. Безрук выделяет следующие наиболее важные характеристики полимера, указывающие на пригодность его для укрепления грунтов:

- растворимость или диспергируемость в воде при введении полимера (или составляющих его мономеров) в грунт, при перемешивании и уплотнении смеси;
- нерастворимость в воде и несмачиваемость после отверждения;
- способность к активной связи полимера с минеральной поверхностью зерен грунта;
- способность к избирательной адсорбции по отношению к гидрофильным глинистым минералам с образованием в дальнейшем хемосорбционных соединений;
- сопротивляемость физическим и химическим воздействиям и биологическому разрушению;
- способность самопроизвольно растекаться по поверхности увлажненного грунта;
- экономичность (возможность применения полимера в небольших количествах, недифицитность и относительная дешевизна).

Для гидрофобизации и укрепления грунтов в основном применяют *поликонденсационные* полимеры:

- мочевиноформальдегидные смолы — эти смолы термореактивны и могут отверждаться при обычной температуре с образованием достаточно прочных и нерастворимых в воде материалов;
- мочевинофурфуроло-формальдегидные смолы — одни из лучших для укрепления грунтов;
- кремнийорганические смолы — из них наиболее применимы полиорганосилоксаны.

Кремнийорганические полимеры обладают повышенной водостойкостью, термостойкостью, хладостойкостью, нетоксичны, не обладают коррозионной активностью. Их основное достоинство — высокая гидрофобность. Особый интерес пред-

ставляют кремнийорганические жидкости марок ГКЖ-10, ГКЖ-11, ГКЖ-94.

Помимо гидрофобизации, ГКЖ могут придавать грунтам ценные свойства. Просачиваясь по пустотам в массу пропитываемого материала, а затем затвердевая, они придают материалу водонепроницаемость и повышают механическую прочность.

9.4. Виды изделий из полимерных материалов

В строительстве получили применение следующие виды изделий из полимерных материалов:

- полимерцементобетоны;
- полимербетоны (пластбетоны);
- геотекстили;
- стеклопластики;
- пластмассы для разметки дорожных покрытий.

Полимерные материалы находят применение в дорожной отрасли в следующих областях:

- разметка дорожных покрытий;
- заполнение температурных швов в цементобетонных покрытиях;
- устройство и ремонт дорожных покрытий;
- уход за свежеуложенным цементобетоном;
- обеспыливание дорог низших категорий.

9.4.1. Полимерцементобетон

Полимерцементобетон — это материал, в котором, кроме цементного вяжущего, содержится полимерное синтетическое вяжущее, вводимое в виде эмульсии.

Появление этого материала вызвано стремлением заменить обычный цементобетон (улучшить его качество) при использовании для устройства фундаментов инженерных сооружений и дорожных покрытий.

В полимерцементобетонах существующая технология водно-цементных бетонов сочетается с современной технологией полимеров.

Полимерцементные композиты делятся на три группы:

- I группа включает *полимербетоны* (ПБ), которые получают путем полимеризации мономера в присутствии инертного наполнителя — цемента. Роль связующего здесь выполняет полимер;
- II группа включает бетоны на основе гидратированного портландцемента, пропитанного мономером, который затем полимеризуется. Это, по существу, *пропитанные полимером бетоны* (ППБ);
- III группа включает портландцементные композиты, в которые вводят мономер или полимер в жидкой, твердой или дисперсной фазе с последующей полимеризацией или отверждением на месте, т.е. это *полимерпортландцементные бетоны* (ППЦБ).

Если в ППБ полимер используется как оболочка на частицах застывшего бетона, то в ППЦБ полимер служит добавкой для свежей бетонной смеси. Оба этих типа материалов (ППБ и ППЦБ) не являются истинными полимерными композитами, так как в них нет полимерной матрицы (вяжущего), подобно матрице в полимербетонах (ПБ).

В табл. 9.5 приведены физико-механические свойства трех типов полимербетонных композитов в сравнении со свойствами традиционных портландцементных бетонов (ПЦБ) и некоторых металлов.

Таблица 9.5

Физико-механические свойства полимербетонных композитов и традиционных конструкционных материалов

Свойства	ПБ	ППБ	ППЦБ	ПЦБ	Сталь	Алюминий
Предел прочности:						
на сжатие, кгс/см^2	1400	1470	420	350	2940	1750
на растяжение, кгс/см^2	98	105	42	18	4900	2100
Модуль упругости $E \cdot 10^3$, кгс/см^2	370	425	265	250	2100	700
Водопроницаемость $Q \cdot 10^4$, м/год	0	0,36	1,15	1,61	0	0

Окончание табл. 9.5

Свойства	ПБ	ППБ	ППЦБ	ПЦБ	Сталь	Алюминий
Плотность, г/см^3	2,3	2,4	2,4	2,5	7,9	2,7
Стойкость к многократному замораживанию-оттаиванию:						
число циклов	3300	3600	1600	590	—	—
потери массы, %	0	0	12	25	—	—
Твердость (ударный молот), усл. ед.	55	52	41	32	—	—
Потери массы за 3 мес. выдержки в 5%-ной HCl, %	0,3	5	13	24	—	—
Расширение за 2 года эксплуатации, %	0,003	0,006	0,25	0,5	—	—
Теплопроводность, ккал/(м · ч·°С)	1,82	1,91	1,97	2,01	—	—
Коэффициент конструктивного качества (ККК)	0,60	0,61	0,18	0,14	0,37	0,65

Полимербетоны на термореактивных смолах характеризуются высокой прочностью на сжатие, растяжение и изгиб, малым водопоглощением, высокой плотностью и износостойкостью, высокой адгезией к цементобетону, металлу, древесине, большой устойчивостью к низким температурам и агрессивной среде.

Ввиду высокой стоимости полимербетонов на термореактивных смолах дорожные покрытия с его применением устраивают тонкослойными по прочному бетонному основанию.

Полимербетоны применяют также для ремонта цементобетонных покрытий. При этом используются цемент-пушки, растворонасосы. При устройстве новых покрытий могут использоваться асфальтоукладчики.

Слои износа на существующих покрытиях могут устраиваться методом поверхностной обработки или методом пропит-

ки. Из полимербетонов на покрытиях устраивают защитные и шероховатые слои толщиной 1,5...2 см. При температуре воздуха 15...20 °С покрытие готово к эксплуатации через 6...10 ч.

Технология приготовления полимербетонной смеси включает:

1) сушку и дозирование минеральных материалов;
2) приготовление вяжущего и его дозирование;
3) **перемешивание всех компонентов смеси в смесительной установке.**

Все указанные процессы можно осуществить на АБЗ или ЦБЗ с использованием стандартного оборудования.

Широкое применение полимербетонов в дорожном строительстве пока сдерживается высокой стоимостью вяжущего.

9.4.2. Полимербетон (пластбетоны)

Полимербетон — искусственный строительный композиционный материал, получаемый на основе синтетических смол, отвердителей, заполнителей, наполнителей и других добавок без участия минеральных вяжущих материалов.

Он применяется в несущих и не несущих монолитных и сборных химически стойких конструкциях и изделиях, работающих при воздействии агрессивных сред.

Разновидностью полимербетонов является ***армополимербетон*** — материал, армированный стальной, алюминиевой, стеклопластиковой арматурой или рубленым стекловолокном.

В качестве связующего применяют синтетические смолы: фурфуролацетоновую (ФА или ФАМ); фураноэпоксидную (ФА-ЭД-20) и др. В качестве крупных заполнителей используют кислотостойкий щебень (кислотостойкость не ниже 96 %). Наполнителем служит кварцевая мука с удельной поверхностью 2300...3000 $см^2/г$.

9.4.3. Геотекстили

Геотекстили — материалы в виде полотна из синтетических волокон, расположенных в одном направлении или беспорядочно. Для производства геотекстилей главным образом используют полиэфир, полипропилен, полиамид и др.

Геотекстили все шире применяют при строительстве автомобильных дорог и аэродромов. Общая площадь применения геотекстиля в мире превышает 30 млн $м^2$.

Важнейшими свойствами геотекстильных материалов в виде полотна являются:

- значительная прочность при растяжении;
- незначительная толщина;
- большая гибкость;
- пористость структуры, обеспечивающая пропуск воды.

Геотекстиль применяют:

- для создания армирующих и дренирующих прослоек в верхней части земляного полотна;
- в конструктивных слоях дорожной одежды;
- для защиты откосов земляного полотна от эрозии и др.

Прослойки геотекстиля позволяют уменьшить расход дорожно-строительных материалов, снизить объем земляных работ, сократить сроки строительства, энергозатраты и транспортные расходы, повысить сроки службы автомобильных дорог и аэродромов.

В последнее время для повышения сдвигоустойчивости верхнего слоя асфальтобетонного покрытия начали применять новую разновидность геотекстиля — ***геосетки***.

Предпочтительным видом вяжущего для изготовления геотекстиля является полиэфир.

По структуре полотна геотекстильные материалы подразделяют на *нетканые* и *тканые*. Большинство синтетических геотекстильных материалов, применяемых в дорожном и аэродромном строительстве, относят к нетканым.

Производство нетканых материалов состоит из двух основных операций: формирование холста из волокон и его упрочнение.

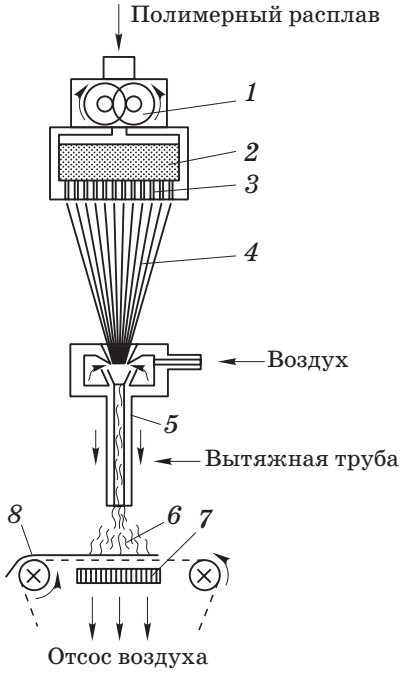


Рис. 9.5. Схема изготовления нетканого полотна из расплава полимера:
1 — насос; *2* — расплав полимера; *3* — фильеры; *4* — невытянутые волокна; *5* — экструдер; *6* — вытянутые волокна; *7* — решетчатый транспортер; *8* — неупрочненное полотно

Широко распространенным способом получения нетканых материалов является *фильерный способ*, поскольку он наиболее производительный и высокомеханизированный.

Фильерный способ позволяет изготавливать нетканый материал непосредственно из расплава полимеров. Для фильерного способа пригодны следующие полимеры: полиэфир, полиамид, полипропилен. Могут быть использованы как первичные (кондиционные), так и вторичные полимеры (отходы). В первом блоке установки (рис. 9.5) для изготовления нетканого полотна из расплава полимеров поддерживают постоянную температуру и продавливают расплав полимера через многочисленные калиброванные капиллярные отверстия (фи-

льеры). Образующиеся при продавливании волокна направляются в вытяжную трубу (второй блок). Туда же направляется струя воздуха, подхватывающая волокна и вытягивающая их со скоростью, в 300–500 раз превышающей скорость на выходе из фильеры. За счет вытягивания происходит молекулярная ориентация полимера в волокне, повышается его прочность.

В дальнейшем холст упрочняется механическим, химическим, термическим или комбинированным способом.

Среди известных способов упрочнения полотна наиболее распространен механический — *иглопробивной*. Он заключается в переплетении волокон иглами с зазубринами, расположенными на пластине (плотность расположения 2000–3000 иголок на линейный метр при ширине 0,3...0,4 м). Пластина приводится в возвратно-поступательное движение приводом синхронно с ходом холста (рис. 9.6). Прочес *4* вводится в рабочую часть иглопробивного устройства транспортером. Иглы *3* пробивают прочес с определенной частотой, что придает ему заданную прочность. Способ применим независимо от исходного сырья, позволяет вырабатывать полотна шириной до 6,5 м с высокой скоростью, связан с незначительными затратами энергии и производственных площадей, не вызывает вредных выбросов в окружающую среду.

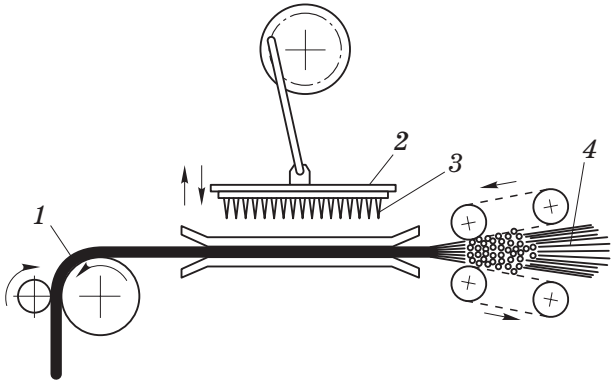


Рис. 9.6. Схема упрочнения нетканого полотна иглопробивным способом:
1 — готовое полотно; *2* — игольница; *3* — иглы; *4* — прочёс

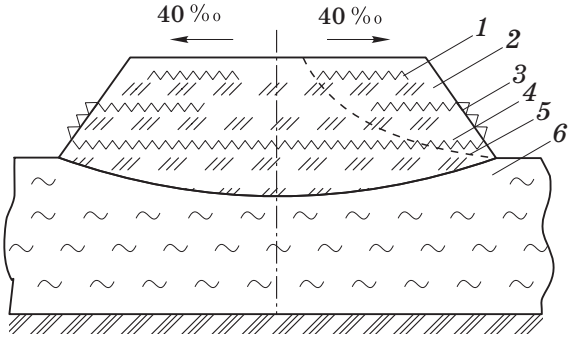


Рис. 9.7. Армирование насыпи прослойками из геотекстиля: *1* — прослойка в зоне сдвига; *2* — насыпь; *3* — прослойка с выпуском на откос; *4* — сплошная прослойка в теле насыпи; *5* — поверхность скольжения; *6* — слабый грунт

Известен рулонный нетканый материал — дорнит, получаемый иглопробивным способом из отходов синтетических волокон и вторичного текстильного сырья. Для производства дорнита используют отходы лавсанового, штапельного и капронового волокна. Дорнит используют для устройства конструктивной и фильтрующей прослойки при строительстве автомобильных дорог на участках слабых грунтов, а также для укрепления откосов и устройства дренажа.

Геотекстильные прослойки в силу способности сопротивляться растяжению и продавливанию могут выполнять роль арматуры (рис. 9.7). Так, геотекстиль применяют в качестве горизонтальных армирующих прослоек в откосах и основании насыпи, для армирования асфальтобетона с целью уменьшения образования трещин и снижения толщины слоя.

Геотекстильные полотна толщиной более 2 мм способны проводить воду в полости полотна и выполнять функцию дрены. Полосы из геотекстиля применяют для вертикального дренирования слабых водонасыщенных грунтов. Дренирующие полотна, закрепленные на тыльной стороне подпорной стенки, обеспечивают вывод воды из застенного пространства. Уложенные в основание дорожной одежды или в тело насыпи из переувлажненного грунта дренирующие текстильные прослойки содействуют осушению грунтового массива.

Использование геотекстильных материалов в дорожном и аэродромном строительстве свидетельствует о рождении принципиально нового направления, способного решать значительный круг практических задач. Применение этих материалов способствует облегчению производства работ, повышению технологической дисциплины и культуры производства в целом.

9.4.4. Стеклопластики

Для обустройства автомобильных дорог путем установки километровых столбов, указательных знаков, ограждающих устройств и постройки павильонов на остановках автобусов применяют ***стеклопластики*** — материалы на основе полимерного связующего и стеклянного наполнителя. Наиболее широко в качестве стеклонаполнителя применяют стеклянные волокна различной формы: нити, ткани, ленты, холсты. В качестве связующих используют полиэфирные, эпоксидные, фенолоформальдегидные, кремнийорганические и другие полимеры.

Применяемые для стеклопластиков стеклянные волокна по сравнению с другими синтетическими и натуральными волокнами имеют повышенную прочность на разрыв (табл. 9.6), химическую стойкость и негорючесть.

Таблица 9.6

Прочность на разрыв различных искусственных и природных волокон

Материал	Прочность, МПа
Волокна из плавленого кварца	80...100
Стекловолокно	До 25
Найлон (нейлон)	4...7
Натуральный шелк	3...5,5
Хлопок	4...6,5

Прочность стеклянного волокна зависит от диаметра волокон: при уменьшении диаметра от 20 до 2 мкм прочность на разрыв возрастает в 10 раз.

В зависимости от расположения в матрице стеклянных волокон и способа уплотнения стеклопластики подразделяются на три группы:

- *стекловолокниты* — стеклопластики на основе рубленого стекловолокна, расположенного хаотично с применением фенолоформальдегидной смолы. Используются для изготовления деталей высокой прочности способом горячего прессования в пресс-формах;
- *стеклотекстолиты* — стеклопластики на основе стеклянных тканей с различным переплетением нитей. Используются как конструкционный электроизоляционный материал;
- *стекловолокнистый анизотропный материал* (*СВАМ*) — стеклопластик на основе *стеклошпона*, волокна которого могут быть расположены в различных слоях либо параллельно друг другу, либо под углом. Стеклопластик СВАМ отличается значительной прочностью при сжатии (420 МПа) и еще большей прочностью при растяжении (480 МПа).

Стеклошпон получают из элементарных волокон следующим образом. Вышедшие из фильер печи волокна смачивают жидкой синтетической смолой и наматывают на барабан. Полученный стеклошпон срезают с барабана и подсушивают. В результате получают стеклошпон с однонаправленным волокном.

Из стеклопластиков получают различные изделия: листовой стеклопластик; крупноразмерные панели для стен; плиты для перекрытий; изделия в виде столбиков для ограждений, километровых и указательных знаков; детали, используемые при строительстве павильонов на автобусных остановках, и др.

9.4.5. Пластмассы для разметки дорожных покрытий

Одним из важных элементов системы организации дорожного движения является дорожная разметка. Общие технические условия для ее осуществления установлены СТБ 1231–2000.

В качестве разметочных линий (наряду с эмалями) рекомендуется использовать термопластики (по СТБ 1231–2000) и

пластики двухкомпонентные холодного нанесения (по ТУ РБ 14559998.177–99).

Толщина линий разметки из термопластиков на дорожных покрытиях составляет от 3 до 6 мм. При этом для дорог высоких категорий она должна быть световозвращающей и сохранять это свойство (по коэффициенту яркости) в течение шести месяцев эксплуатации.

Пластмассы для разметки дорожных покрытий представляют собой смесь светлых минеральных заполнителей, полимерного связующего, пигментов, а в необходимых случаях — отвердителей и пластификаторов.

В зависимости от вида полимерного связующего, пластмассы для устройства дорожной разметки могут быть термопластичные и термореактивные. В настоящее время большее применение получили термопластичные пластмассы. При этом предпочтение отдается тем из них, в которых не требуется использовать дорогой дефицитный компонент — диоксид титана (TiO_2).

Одним из таких разметочных материалов является термопластик, разработанный дорожниками Украины (г. Донецк). В нем в качестве связующего использована композиция, состоящая из полистирола и инденкумароновой смолы. Термопластик имеет следующий состав (в %): полистирол — 15...25; инденкумароновая смола (светлая с температурой размягчения 105 °С) — 15...25; пластификатор (сложный эфир фталевой кислоты или хлорпарафин — 10...20; наполнители (кварцевый песок) — остальное. Такой термопластик обладает высокой адгезией к асфальто- и цементобетону (0,8...1,7 МПа) и водопоглощением 0,1 %.

Разметку выполняют с помощью разметочной машины в один слой. Расплавленный термопластик (температура 160...180 °С) после нанесения на поверхность покрытия быстро остывает и затвердевает (через 5 мин возможно движение транспорта).

Известен также *акриловый* разметочный термопластик (ТУ ВУ 102 307 985.449–2006), находящийся пока в стадии апробации.

В настоящее время разработаны рекомендации по выбору материалов, технологий и механизмов нанесения горизонтальной дорожной разметки в зависимости от состояния дорожного покрытия (ДМД 02191.2.009–2007).

9.4.6. Полимерные материалы, применяемые при уходе за свежеуложенным цементным бетоном

Обязательным условием нормального твердения цементного бетона является длительное сохранение влаги в его теле. При устройстве цементобетонных покрытий в большинстве случаев для этой цели поверхность бетона покрывают слоем песка, который затем регулярно поливают водой в первые 2–3 недели. Такой способ ухода за бетоном связан с большими трудовыми и материальными затратами, которые значительно возрастают при строительстве дорог в районах с жарким и сухим климатом с ограниченным количеством источников снабжения водой.

Эффективный уход за бетоном без поливки водой может быть осуществлен с помощью полимеров: пленкообразующих веществ и пленок.

Пленкообразующее вещество — это жидкость, которая после нанесения ее на поверхность бетона образует тонкую водонепроницаемую пленку. К числу основных пленкообразующих жидкостей, которые применяются при уходе за бетоном, относятся лак-этиноль и композиции на основе поливинилацетатных эмульсий.

Лак-этиноль, или дивинилацетиленовый лак (ТУ 1267–57), является отходом производства синтетического каучука. Он представляет собой темно-коричневого цвета раствор полимеров производных ацетилена (дивинилацетилена, тетрамера ацетилена и др.) в ксилольной фракции, стабилизированный древесно-смоляным антиокислителем (многоатомный фенол марки АО). Однако поскольку этот материал обладает резким неприятным запахом, токсичен и огнеопасен, он не получил широкого распространения.

При уходе за свежеуложенным цементным бетоном могут быть использованы тонкие ***полиэтиленовые пленки***.

Пленку изготавливают из полиэтилена методом непрерывного прессования (экструзии) с последующим растяжением. Ее выпускают в виде ленты толщиной от 0,04 до 0,2 мм. Полиэтиленовая пленка обладает следующими свойствами:

- морозостойкость — 60 °С;
- предел прочности при растяжении — 13...18 МПа;
- водонасыщение за 24 ч — 0,01 %;
- относительное удлинение в продольном направлении 200...400 %, в поперечном — 450...550 %.

Большой эффект дает укладка полиэтиленовой пленки под слой цементобетона. Пленка, расстилаемая непосредственно по спланированному основанию, препятствует отсосу воды из бетонной уплотняемой смеси в процессе ее твердения, а в дальнейшем является преградой для капиллярного подсоса влаги из грунта земляного полотна в слои дорожной одежды.

9.4.7. Газонаполненные пластмассы

Для устройства противопучинных, гидро- и теплоизоляционных слоев в земляном полотне применяют ***газонаполненные пластмассы*** — полимерные материалы, являющиеся дисперсными системами типа твердое тело — газ.

Наиболее широкое применение находят пенопласты на основе полистирола и поливинилхлорида.

В зависимости от количества газообразователя можно получить *пенопластовые плиты на основе полистирола* со средней плотностью от 35 до 80 кг/м^3.

Пенопласты на основе поливинилхлорида представляют собой легкую газонаполненную пластмассу в виде твердой пены с равномернозамкнутой пористой структурой. Сырьем для поливинилхлорида служит поливинилхлоридная смола, а газообразователем — соли угольной кислоты.

Кроме указанных выше газонаполненных пластмасс, известна также *мипора* — пенопласт на основе мочевиноформальдегидной смолы. Этот материал огнестоек, но легко впитывает влагу и недостаточно устойчив в агрессивных средах. Применяется в строительстве как тепло- и звукоизоляционный материал.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Что такое пластмассы?

2. Что такое полимеры и какого строения они бывают?

3. В каких состояниях могут быть полимеры?

4. Назовите важнейшие термопластические полимеры.

5. Назовите важнейшие термореактивные полимеры.

6. Что такое наполнители, пластификаторы, отвердители и их роль в пластмассах?

7. Что такое геотекстили, их получение и применение?

8. Что такое стеклопластики и газонаполненные пластмассы?

9. Приведите характеристики пластмасс для разметки дорожных и аэродромных покрытий

10. Приведите примеры применения пленкообразующих веществ и пленок в строительстве.

10 ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ, ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ, ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЕ, ЛАКОКРАСОЧНЫЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

10.1. Теплоизоляционные материалы

Для защиты инженерных объектов от возможных теплопотерь при наличии градиентов температур широко применяют теплоизоляционные материалы.

10.1.1. Общие положения

Теплоизоляционными материалами **(*ТИМ*)** называют материалы и изделия, используемые для тепловой изоляции ограждающих конструкций зданий, промышленного и энергетического оборудования и различных трубопроводов с целью уменьшения теплообмена с окружающей средой.

На производственных предприятиях дорожной отрасли (АБЗ, ЦБЗ, битумные и эмульсионные базы, заводы железобетонных изделий) имеется ряд промышленных установок, использующих большое количество тепла.

С целью энергосбережения на АБЗ требуется теплоизолировать: битумопроводы, наземные емкости для хранения горячего битума, битумоплавильни, сушильные барабаны, накопительные емкости для асфальтобетонных смесей. На ЦБЗ требуется теплоизолировать устройства (камеры) для тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий, системы котельных для получения пара.

Применение ТИМ позволяет:

- уменьшить толщину и массу стен и других ограждающих конструкций;
- сократить расход основных конструкционных материалов и топлива.

Классификация теплоизоляционных материалов и изделий проводится по следующим признакам: структуре, форме, виду основного исходного сырья, средней плотности, жесткости (относительной деформации при сжатии), теплопроводности и горючести.

По структуре теплоизоляционные материалы (ТИМ) делят:

- на волокнистые (минераловатные, стекловолокнистые и др.);
- зернистые (перлитовые, вермикулитовые, совелитовые, известково-кремнеземистые и др.);
- ячеистые (изделия из ячеистых бетонов, пеностекло, ячеистые пластмассы совелитовые).

По форме и внешнему виду ТИМ бывают:

- штучные (плиты, блоки, кирпичи, цилиндры, полуцилиндры, сегменты);
- рулонные (маты, полосы);
- шнуровые (шнуры, жгуты);
- сыпучие и рыхлые (вата каменная, стеклянная, вспученные перлит (песок) и вермикулит).

По виду исходного сырья ТИМ делят:

- на неорганические (каменная вата и стеклянная, ячеистые бетоны, материалы на основе асбеста, керамические и др.);
- органические (древесно-волокнистые и древесно-стружечные плиты, торфяные плиты, материалы из пористых пластмасс и др.);
- комбинированные (композиционные) материалы, состоящие из органического и неорганического сырья (фибролит, арболит, минеральные волокна с органическим связующим).

По средней плотности ρ_o ТИМ делят на следующие марки:

- особо легкие (ОЛ): 15, 25, 35, 50, 75, 100;
- легкие (Л): 125, 150, 200, 250, 300;
- тяжелые (Т): 400, 50, 500, 600.

По теплопроводности различают три класса ТИМ:

- низкой теплопроводности — класс А (меньше 0,058 Вт/(м · С));

- средней теплопроводности — класс Б (0,058...0,116 Вт/(м · °С));
- повышенной теплопроводности — класс В (0,115...0,175 Вт/(м · °С)).

По возгораемости ТИМ делятся на три группы: несгораемые, трудносгораемые, сгораемые.

Физико-технические характеристики некоторых наиболее эффективных ТИМ приведены в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Физико-технические характеристики теплоизоляционных материалов

Наименование материала	Средняя плотность материала ρ_o, кг/м^3	Теплопроводность в сухом состоянии λ, Вт/(м·°С)	Пористость П, %
Пенополистирол, пенополиуретан и другие пенопласты	20...35	0,04...0,05	99...97
Каменная вата	150...250	0,05...0,075	94...90
Пеногипс	250...400	0,07...0,095	98...90
Ячеистое стекло	180...350	0,065...0,09	95...98
Газосиликат	250...400	0,07...0,105	90...85
Пенополистиролбетон	250...350	0,065...0,095	80...70
Керамзитобетон	500...600	0,14...0,16	77...65
Древесина и другие ТИМ из растительных волокон	500	0,15...0,29	60...70

Важнейшей структурной характеристикой ТИМ является пористость, от которой зависят средняя плотность ρ_o, теплопроводность λ, прочность R, газопроницаемость и другие технические показатели. Большое значение имеет распределение воздушных пор в материале и их характер, а также химический состав, молекулярное строение каркаса и условия применения ТИМ.

Теплопроводность является главной технической характеристикой теплозащитных свойств материала. При равной пористости более высокими теплоизоляционными показателями обладают материалы, имеющие мелкие замкнутые поры, так как они уменьшают передачу теплоты конвекцией и излучением. Это особенно необходимо учитывать при выборе материалов для высокотемпературной изоляции. Увлажнение и тем более замерзание воды в порах материала ведут к резкому увеличению теплопроводности, так как теплопроводность воды ($\lambda_в$–(0,58 Вт/(м · °С)) примерно в 25 раз, а льда (λ–(2,32 Вт/(м · °С)) — в 100 раз больше, чем воздуха. Поэтому ТИМ необходимо предохранять от увлажнения.

Прочность ТИМ, вследствие их пористого строения, относительно невелика. Предел прочности при сжатии обычно колеблется от 0,2...2,5 МПа. Требуется, чтобы прочностные характеристики ТИМ были достаточны для их сохранности при транспортировании, складировании, монтаже и работе в конкретных условиях эксплуатации.

Химическую и *биологическую стойкость* ТИМ повышают, применяя различные защитные покрытия и обработку антисептиками.

Применение ТИМ в строительстве позволяет резко снизить массу конструкций, затраты на сооружение зданий, уменьшить потребность в основных строительных материалах, сократить потери тепла в окружающую среду через ограждающие конструкции и тем самым уменьшить расход топлива, повысить комфортность помещений.

Весьма эффективным является использование ТИМ для изоляции тепловых агрегатов, технологической аппаратуры и трубопроводов. В холодильной промышленности ТИМ применяют для уменьшения затрат энергии на охлаждение.

10.1.2. Неорганические теплоизоляционные материалы

В строительстве в качестве ***рыхлых ТИМ*** используют:

- минеральную и стеклянную вату;
- вспученные перлит и вермикулит;
- гранулированные доменные и котельные шлаки и золы.

Минеральная вата состоит из тонких спутанных между собой волокон диаметром 5...12 мкм. Ее получают из расплавов некоторых горных пород или металлургических и топливных шлаков.

Минеральная вата применяется для теплоизоляции холодных (−100 °С) и горячих (более 300 °С) поверхностей.

Основными видами изделий с применением стекловаты являются жесткие и полужесткие плиты на полимерном вяжущем. Из минеральной ваты на синтетическом связующем изготавливают цилиндры и полуцилиндры для теплоизоляции трубопроводов с температурой поверхности до 400 °С.

Стекловата состоит из беспорядочно расположенных волокон, получаемых из расплавленного стекла. Она обладает теми же свойствами, что и минеральная вата.

Вспученный перлит получают измельчением и обжигом вулканических стекол (перлита, абсидиана и др.), содержащих небольшое количество химически связанной воды. В процессе быстрого обжига происходит значительное увеличение объема материала — вспучивание.

Вспученный вермикулит также получают быстрым обжигом природного вермикулита (биотитовой слюды), часто содержащего более 10 % воды. Вспученный материал измельчают.

Гранулированные доменные и котельные шлаки бывают:

- гранулированные (быстроохлаждаемые) доменные — смесь округлых и игловатых зерен мельче 10 мм стекловатой структуры; зерна обычно полые (пористые) с низкой прочностью и теплопроводностью;
- топливные (котельные) — остатки от сжигания в топках твердого топлива (каменного, бурого угля, кокса). Это скопление различных по величине и форме кусков пористо-ноздреватого сложения;

Гранулированные шлаки применяют в виде шлакоблоков как эффективный теплоизоляционный материал.

Неорганические рыхлые материалы применяют для теплоизоляционных засыпок и набивок, а также для получения жестких и гибких теплоизоляционных материалов. Они имеют небольшую плотность (75...200 кг/м^3) и низкие коэффициенты теплопроводности — от 0,04 до 0,087 Вт/(м · °С).

Структура теплоизоляционных материалов характеризуется наличием твердого вещества и газообразной фазы, заключенной в порах. Твердая фаза имеет большую теплопроводность и поэтому, когда она является в структуре непрерывной (пор мало), теплопроводность материала оказывается значительной. Теплопроводность пор определяется теплопроводностью заключенного в них воздуха, значение которого при 25 °С составляет 0,025, а при 100 °С — 0,031 Вт/(м · К). Отсюда видна теплоизоляционная эффективность пористых теплоизоляционных материалов.

К ***жестким ТИМ*** относятся:

- скорлупы и сегменты из пропитанной синтетическими смолами уплотненной минеральной ваты, подвергаемые для отверждения смол тепловой обработке;
- плиты, скорлупы и сегменты на битумном связующем;
- плиты, скорлупы и сегменты из ячеистых бетонов (крупнопористых керамзитобетона, керамзитопластбетона);
- плиты, скорлупы и сегменты из вспученных вермикулита и перлита;
- плиты из пеностекла.

Жесткие теплоизоляционные материалы и изделия применяют для теплоизоляции ограждающих конструкций зданий, поверхностей промышленного оборудования, холодильников, трубопроводов. Требования к этим материалам приведены в табл. 10.2.

Таблица 10.2

Требования к неорганическим жестким теплоизоляционным материалам

Изделия	Марка по пластичности в сухом состоянии	Предел прочности, кг/см^2 (МПа), не менее		Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии при 25±5 °С, ккал/(м · ч · °С) [Вт/(м · °С)], не более
		на сжатие	на изгиб	
Плиты, скорлупы и сегменты жесткие минеральные на синтетическом связующем	200 250	— —	1,5 (0,15) 1,5 (0,15)	0,05 [0,058] 0,055 [0,06]

Окончание табл. 10.2

Изделия	Марка по пластичности в сухом состоянии	Предел прочности, кг/см^2 (МПа), не менее		Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии при 25±5 °С, ккал/(м · ч · °С) [Вт/(м · °С)], не более
		на сжатие	на изгиб	
Плиты, скорлупы и сегменты жесткие минеральные на битумном связующем	250 300 350 400	— — — —	1,1 (0,11) 1,2 (0,12) 1,3 (0,13) 1,4 (0,14)	0,055 [0,064] 0,06 [0,07] 0,065 [0,075] 0,07 [0,08]
Плиты, скорлупы и сегменты перлитовые	250 300 350 400 500	— — — — —	2,5 (0,25) 2,5 (0,25) 3 (0,3) 3 (0,3) 3 (0,3)	0,065 [0,075] 0,07 [0,081] 0,075 [0,087] 0,08 [0,093] 0,09 [0,104]
Плиты из пеностекла	200 300	5 (0,5) 10 (1)	— —	0,08 [0,093] 0,09 [0,104]
Плиты из крупнопористого керамзитопластбетона	200 400	3 (0,3) 8 (0,8)	— —	0,09 [0,104] 0,12 [0,14]
Плиты из керамзитобетона	400 500	5 (0,5) 8 (0,8)	— —	0,12 [0,14] 0,15 [0,17]

К ***гибким ТИМ*** относятся:

- маты;
- полужесткие плиты и скорлупы, изготовляемые из пропитанной синтетическими смолами минеральной или стеклянной ваты с последующим уплотнением и тепловой обработкой;
- войлок — уплотненная минеральная вата, пропитанная битумом;
- плиты из минеральной ваты на битумном связующем;
- маты прошивные, получаемые прошивкой слоя минеральной ваты или стекловаты, уложенного в оболочку из бумаги или металлической сетки.

Гибкие теплоизоляционные материалы характеризуются низким коэффициентом теплопроводности в сухом состоя-

нии — от 0,04 до 0,07 ккал/(м · ч · °С) [0,046...0,08 Вт/(м · °С)] и используются для теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и поверхностей промышленного оборудования и трубопроводов.

10.1.3. Органические теплоизоляционные материалы

К ***жестким материалам и изделиям*** в основном относятся:

- древесно-волокнистые плиты;
- торфяные плиты, скорлупы, сегменты, изготавливаемые путем формования и сушки малоразложившегося торфа;
- плиты, скорлупы и сегменты из пористых пластмасс, подразделяемые по виду применяемых смол на полистирольные, поливинилхлоридные и фенолоформальдегидные.

В табл. 10.3 приведены требования, предъявляемые к органическим жестким материалам и изделиям.

Таблица 10.3

Требования к органическим жестким теплоизоляционным материалам и изделиям

Изделия	Марка по плотности в сухом состоянии	Предел прочности на изгиб, кгс/см^2 (МПа), не менее	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии при 25±5 °С, ккал/(м · ч · °С) [Вт/(м · °С)], не более
Плиты древесно-волокнистые изоляционные	150 200 250	4 (0,4) 8 (0,8) 12 (1,2)	0,04 [0,046] 0,05 [0,058] 0,06 [0,07]
Плиты, скорлупы, сегменты торфяные изоляционные	150 200 250	2,5 (0,25) 2,5 (0,25) 2,5 (0,25)	0,05 [0,058] 0,055 [0,064] 0,06 [0,07]
Плиты, скорлупы и сегменты из пористых пластмасс (полистирольных на суспензионном полистироле)	25 35	1 (0,1) 2 (0,2)	0,03 [0,035] 0,03 [0,035]

К ***гибким органическим ТИМ*** относятся:

- строительный войлок, полученный из грубой шерсти и отходов шерстяных производств;
- гофрированный картон;
- маты из пористого полиуретана;
- гидрофобный газоасфальт;
- мипора.

Строительный войлок, выпускаемый в виде полотнищ длиной 1000...2000, шириной 500...2000 и толщиной 12 мм, не подвергается гниению, не горит, гигроскопичен, перед использованием антисептируется.

Гофрированный картон — твердая, толстая бумага с периодически изогнутой поверхностью (плотность 250 г/см^2). Изготавливается из грубых волокнистых материалов (древесная масса, макулатура); используется как теплоизоляционный материал.

Пористый полиуретан — газонаполненная полиуретановая смола, свойства которой можно изменять в желаемом направлении путем использования различных наполнителей.

Гибкие материалы применяют для теплоизоляции отдельных частей конструкций и поверхностей промышленного оборудования и трубопроводов.

Гидрофобный газоасфальт изготавливают из битумоизвестковой пасты с добавлением 10...50 % по массе портландцемента и газообразователя (алюминиевой пудры). Используют для кровельных панелей и теплогидроизоляции трубопроводов.

Мипора — пенопласт, получаемый вспениванием и отверждением композиций на основе карбамидного полимера. Является самой легкой газонаполненной пластмассой (плотность 10...20 кг/м^3, теплопроводность 0,03...0,035 Вт/м · °С

10.2. Гидроизоляционные материалы

Известно, что одним из наиболее агрессивных факторов, воздействующих на материалы инженерных конструкций, является вода. Она вызывает снижение прочности большинства строительных композитов, стимулирует развитие коррозионных процессов в металлах и бетонах, а в деревянных конструкциях вызывает появление грибков и плесени, разрушающих структуру целлюлозы. Поэтому инженерные конструкции необходимо защищать с помощью гидроизоляционных материалов, которые должны противостоять прежде всего действию воды любого вида и фазового состава.

Важным обстоятельством, заставляющим придавать большое значение гидроизоляционным работам, является их относительно низкая стоимость (по сравнению с теми огромными затратами, которые неизменно возникают при отсутствии качественной гидроизоляции инженерных сооружений). Основными причинами повреждения, например, мостовых сооружений являются ошибки в проектировании гидроизоляции, некачественное ее устройство и неправильная эксплуатация сооружения в целом.

При наличии переменных циклов замораживания–оттаивания происходит разрушение защитного слоя арматуры в железобетонных конструкциях. Установлено, что с течением времени (примерно через 5 лет) прочность защитного слоя конструкции уменьшается.

10.2.1. Водопроницаемость бетонов

Основное влияние на водопроницаемость бетонов оказывают показатели их структуры, общий объем пор, содержание замкнутых и капиллярных пор.

Объем пор в бетоне характеризует его общую проницаемость, которая косвенно определяется *водопоглощением*. Большинство доброкачественных бетонов имеет величину водопоглощения менее 10 %.

Проницаемость бетона оценивается по коэффициенту проницаемости ($K_ф$), который равен количеству воды, прошедшей

через поверхность бетона площадью в 1 см^2 в течение 1 ч при постоянном перепаде давления:

$$K_{ф} = \frac{V_{в}}{St\left(p_1 - p_2\right)}, \qquad (10.1)$$

где $V_{в}$ — количество прошедшей воды, см^3; S — площадь поверхности, см^2; t — время, ч; $(p_1 - p_2)$ — перепад давления, Па.

В строительстве проницаемость бетонов оценивают маркой по водонепроницаемости (2, 4, 6, 8, 10, 12). Цифры обозначают наибольшее давление в паскалях, при котором бетон не фильтрует воду.

При эксплуатации инженерных конструкций из бетона необходимо учитывать ***агрессивность воды***, определяемую ее составом.

Не допускается наличие в бетоне хлорид-ионов более 0,03...0,05 % по массе бетона, что увеличивает растворимость $Ca(OH)_2$ и устраняет ее пассивирующее действие на арматуру.

Лаборатория Объединения цементных заводов Германии для оценки агрессивности вод приводит следующие данные (табл. 10.4).

Таблица 10.4

Агрессивность вод (по данным лаборатории Объединения цементных заводов Германии)

Агент	Среда		
	слабоагрессивная	среднеагрессивная	сильноагрессивная
pH	6,5...5,5	5,5...4,5	Менее 4,5
Агрессивная CO_2, мг/л	15...30	30...60	Более 60
NH_4^{2+}, мг/л	15...30	30...60	Более 60
Mg^{2+}мг/л	100...300	300...1500	Более 1500
SO_4^{2-}, мг/л	200...600	600...2400	Более 2400

Преимуществом этой таблицы является простота ее использования. Однако в ней отсутствует оценка агрессивности мягких вод.

В настоящее время существуют рекомендации по подбору состава и свойств бетонов, подвергшихся воздействию данной среды.

Так, для *неагрессивных сред* состав бетона выбирается только с точки зрения требуемой прочности.

Для *слабоагрессивных и среднеагрессивных сред* следует применять бетон повышенной плотности с В/Ц не выше 0,65. Количество цемента в бетоне должно составлять более 300 кг/м^3. Если цемент обладает повышенной стойкостью к воздействию какого-либо агрессивного составляющего, количество цемента может быть уменьшено. При этом бетон должен обладать оптимальным гранулометрическим составом заполнителей. Особое внимание следует обращать на содержание мелких фракций заполнителей (до 5 мм).

Для *сильноагрессивных сред* должны применяться те же рекомендации, что и для среднеагрессивных, за исключением того, что В/Ц должно быть не больше 0,45.

При выборе состава бетона рекомендуется проводить испытания водопоглощения пробных образцов бетона. Через 90 дней после приготовления смеси образцы подвергаются давлению воды порядка 7 кгс/см^2, при этом они должны пропитаться на глубину не более 80 мм. Если это условие не может быть выполнено, на бетон следует нанести защитное покрытие или же произвести его флюатирование.

Для сильноагрессивных сред количество цемента в бетоне должно быть не менее 350 кг/м^3, для слабоагрессивных сред глубина водонасыщения образцов бетона не должно быть больше 40 мм. Для железобетона толщина защитного слоя арматуры должна составлять не менее 50 мм. Кроме того, следует дополнительно защищать поверхность бетона плотным химическим стойким покрытием.

10.2.2. Виды гидроизоляции и условия их применения

Окрасочная гидроизоляция. Окрасочная гидроизоляция представляет собой несколько слоев пленкообразующих жидких или пластичных гидроизоляционных материалов, нанесенных на изолируемую поверхность пневматическим на-

пылением или набрызгом под высоким давлением, а при небольших объемах работ — валиками, кистями и шпателями. Толщина одного слоя — 0,05...1 мм. Все гидроизоляционное покрытие состоит из слоя грунтовки, 2–6 слоев окрасочного покрытия и защитного слоя; общая толщина покрытия — 4 мм.

Для окрасочной гидроизоляции применяют нефтяные битумы, битумные эмали и полимербитумные мастики, наносимые механическим путем в горячем виде или в виде холодных эмульсий. Недостатком битумных мастик является их растрескивание при $t < 10$ °С.

Мастики и эмульсии. ***Мастики*** — это искусственные смеси нефтяных битумов или дегтей с тонкоизмельченными минеральными или органическими наполнителями. Наполнители для мастик подразделяются:

- на пылевидные (известняковый, доломитовый и кварцевый порошки, цемент, золы от сжигания каменного угля и горючих сланцев);
- волокнистые (асбест, минеральная вата и др.).

Наполнители повышают теплостойкость, уменьшают хрупкость при низких температурах и расход вяжущих.

По виду связующего мастики подразделяют на битумные, битумно-полимерные, резинобитумные, дегтевые и др.; по способу применения — на горячие (с предварительным подогревом до 160...180 °С для битумных мастик и 130...160 °С для дегтевых) и холодные (применяются без подогрева при температуре окружающего воздуха до 5 °С и с подогревом до 60...70 °С при более низких температурах).

По назначению горячие мастики разделяют: на приклеивающие, кровельно-изоляционные, гидроизоляционные, асфальтовые, антикоррозионные.

Приклеивающие мастики используют для склеивания рулонных материалов при устройстве многослойных кровельных покрытий и для гидроизоляции. Приклеивающие мастики разделяют на битумные, применяемые для склеивания битумокартонов (рубероид, пергамин), и дегтевые — для приклеивания дегтекартонов (толь и др.).

Гидроизоляционные асфальтовые мастики (содержат до 65...70 % порошкообразного наполнителя) применяют для

устройства литой и штукатурной гидроизоляции, а также в качестве связующего при изготовлении штучных изделий (плит).

Антикоррозионные битумные мастики употребляют для защиты основного материала строительных конструкций (бетон, металл, древесина) от агрессивных сред (кислот, щелочей, а также сернистого газа, паров аммиака и др.).

Холодные битумные мастики изготовляют путем растворения битумов в органических растворителях (бензин, соляровое масло, скипидар, уайт-спирит и др.) и их соединения с порошкообразными материалами.

Холодные мастики применяют для устройства безрулонных кровель с обязательным армированием (полимерные сетки).

По теплостойкости мастики различают по маркам. Их теплостойкость характеризуется наибольшей температурой, при которой мастика, склеивающая два слоя пергамина или толя, не вытекает при выдержке при уклоне в 45°. Марка мастики выбирается в зависимости от уклона кровли и других эксплуатационных условий.

Битумные и ***дегтевые*** эмульсии применяют:

- для устройства защитного гидроизоляционного и пароизоляционного покрытия;
- грунтовки основания под гидроизоляцию и приклейки рулонных битумных и дегтевых материалов.

Эмульсии приготавливают в смесительных установках (гомогенизаторах).

Гидроизоляционный битумно-полимерный материал. Это холодная битумно-полимерная краска, полученная путем смешивания строительного битума БН 70/30, низкомолекулярного полиэтилена и каменноугольного сольвента (растворителя). Рекомендуется для гидроизоляционного покрытия долговременных сооружений, отличается высокой водоустойчивостью и надежностью.

Тиоколовая гидроизоляция пролетных строений мостов. Отечественное мостостроение в настоящее время располагает мощной высокопроизводительной индустриальной базой для изготовления обычных и предварительно напряженных же-

лезобетонных блоков пролетных строений длиной от 5 до 33 м и весом от 10 до 110 т.

Обеспечение стабильной несущей способности пролетных строений требует полной водонепроницаемости проезжей части. Действующие строительные нормативные документы предусматривают устройство *битумной гидроизоляции*. Широко применяемые битумные материалы для гидроизоляции пролетных строений мостов характеризуются низкой стоимостью, недефицитностью, хорошо освоенной технологией их применения.

Однако многочисленными обследованиями установлено, что битумная гидроизоляция не гарантирует полной водонепроницаемости пролетных строений из-за нарушения сплошности битумного покрытия, утрачивающего эластичность при отрицательной температуре (около −25 °С). Поэтому на пролетных строениях с битумной гидроизоляцией нередко наблюдается выщелачивание бетона с развитием коррозии арматуры. Восстановление на эксплуатируемых мостах сплошности гидроизоляции представляет собой трудную задачу, требующую перерыва движения по ним и больших затрат.

Более морозоустойчивая и эксплуатационно-надежная гидроизоляция для северной строительно-климатической зоны может быть создана на основе применения полимерных материалов.

Для гидроизоляции пролетных строений мостов из числа полимерных материалов наибольший интерес представляет ***тиокол*** — представитель жидких полусульфидных каучуков, которые образуют при вулканизации синтетический резиноподобный материал, состоящий из атомов углерода и серы.

Жидкие тиоколы вулканизируются в присутствии специальных добавок на воздухе при обычной температуре (+20 °С) с образованием через 4..24 ч прочных, высокоэластичных, практически безусадочных нестареющих резин. На практике применяют двухкомпонентные тиоколовые составы, состоящие из основной и вулканизирующей пасты, и трехкомпонентные, в которые вводят дополнительно ускоритель.

Тиоколовые эластомеры высокопрочны, эластичны, имеют высокое сцепление с бетоном, сохраняют свою эластичность

при отрицательных температурах (до −50 °С), водостойки, водонепроницаемы, устойчивы к атмосферным воздействиям. По сравнению с битумом их сцепление с бетоном выше в 4–5 раз, прочность — в 5–7 раз, деформативность — в 10–20 раз.

Кровельные и гидроизоляционные материалы. Кровельные и гидроизоляционные материалы на основе битумов, дегтя и их смесей делят на рулонные и листовые. ***Рулонные материалы*** подразделяются на осно́вные и безосно́вные. Осно́вные материалы получают путем обработки основы — картона, бумаги, стеклоткани, стекловойлока — битумами, дегтями и их смесями; безосно́вные в виде полотнищ заданной толщины получают путем прокатки на каландрах смесей, состоящих из связующего (битумов или дегтей), наполнителей и добавок.

К рулонным основным материалам относятся покровные: рубероид, толь, дегтебитумные материалы, стеклоткань и стекловойлок, асфальтовые армированные маты.

Рубероид — рулонный материал, полученный пропиткой кровельного картона мягкими нефтяными битумами с покрытием одной или двух сторон тугоплавким битумом с последующей посыпкой. Посыпка повышает атмосферостойкость и улучшает внешний вид материала. Рубероид применяют для покрытия скатных и пологих кровель, причем для верхнего слоя используют рубероид с крупнозернистой посыпкой.

Стеклорубероид — рулонный кровельный и гидроизоляционный материал. Его изготавливают путем нанесения на стекловолокнистую основу с двух сторон битумного вяжущего вещества. Лицевую сторону кровельного стеклорубероида покрывают крупнозернистой или чешуйчатой посыпкой, а внутреннюю — тонокдисперсными минеральными порошками. Преимуществом стеклорубероида по сравнению с обычным рубероидом является бо́льшая прочность и стабильность стекловолокнистой основы, что способствует повышению противогнилостной устойчивости и высокому сопротивлению разрушению в условиях повышенной влажности.

Стеклорубероид в зависимости от вида посыпки и назначения материала выпускают в виде рулонов различных марок.

Пергамин — рулонный кровельный и гидроизоляционный материал, который изготавливают из кровельного картона,

пропитанного легкоплавким битумом, без покровного слоя и без посыпки. Пергамин применяют как надкладочный материал для нижних слоев многослойных кровельных покрытий, а также для паро- и гидроизоляции.

Толь — рулонный материал, получаемый пропиткой и покрытием кровельного картона дегтями. Толь с крупнозернистой посыпкой используется для устройства верхнего слоя пологих и плоских кровель, с песчаной посыпкой — устройства кровель временных сооружений, гидроизоляции фундаментов и других каменных и деревянных частей сооружений.

Толь используют во временных конструкциях. Для увеличения срока службы кровли верхний слой периодически покрывают горячим разжиженным дегтем с последующей посыпкой мелкозернистым песком.

Дегтебитумные кровельные материалы изготавливают путем пропитки кровельного картона дегтем, а затем покрытия его с обеих сторон битумом с последующей минеральной посыпкой.

Стеклоткань и *стекловойлок* — рулонные материалы, получаемые путем совмещения основы (стеклоткани и стекловойлока) с битумной, резинобитумной или битумно-полимерной пленками и покрытые с одной или с обеих сторон сплошным слоем посыпки.

Асфальтовые армированные маты изготовляются путем покрытия предварительно пропитанной стеклоткани с двух сторон битумом или гидроизоляционной асфальтовой мастикой. Они применяются для устройства оклеечной гидроизоляции и уплотнения деформационных швов.

Толь-кожа — материал, который получают пропиткой картона дегтем. Применяется в качестве подкладочного материала под толь при устройстве многослойных покрытий.

Гидроизол — материал, получаемый пропиткой асбестового картона нефтяным битумом. Он употребляется для оклеечной гидроизоляции подземных и других сооружений, а также для защитных противокоррозионных покрытий металлических трубопроводов.

К безосно́вным рулонным материалам относятся изол, бризол и др.

Изол изготавливается из резинобитумного связующего, полученного термомеханической обработкой смеси девулканизированной резины, битума, минерального наполнителя и антисептика с последующей прокаткой массы на каландрах в полотнища заданной толщины.

Изол производят двух марок: без добавок (И-БД) и с полимерными добавками (И-ПД). Применяют изол для оклеечной гидроизоляции фундаментов и других конструкций зданий и сооружений.

Бризол получают прокаткой на каландрах массы, приготовленной смешением нефтяного битума, дробленой резины, асбестового волокна и пластификатора. Бризол делят на две марки в зависимости от прочности и температуры воздуха, при которой возможно его применение: средней прочности и повышенной прочности. Используют бризол для антикоррозионной защиты металлических конструкций трубопроводов.

Борулин изготавливают из смеси мелкого асбестового волокна и битума с последующей прокаткой на каландрах в полотнища площадью 5 м^2. Его применяют для гидроизоляции и заделки температурных швов в цементобетонных дорожных покрытиях.

Битумополимерный материал ГМП — высококачественный гидроизоляционный материал, получаемый путем смешения нефтяного битума БН 70/30 или БН 90/10, полиизобутилена и фенолоформальдегидного полимера с последующей минеральной посыпкой. Его используют в строительстве для устройства гидроизоляции и многослойных кровельных ковров.

Листовые материалы и штучные изделия. *Кровельные битумные листы* изготовляют путем пропитки плотной картонной основы битумом и нанесения покровного слоя, состоящего из тугоплавкого битума с 30 % наполнителя. Температура размягчения пропиточного битума должна быть не менее 60 °С. В соответствии с массой 1 м^2 картона (г) листы выпускают двух марок: ЛБ-500 и ЛБ-650 с крупнозернистой цветной посыпкой. Фасонные битумные кровельные листы производят как прямоугольной, так и шестигранной формы на рубероидном агрегате. Их укладывают в верхние слои кровли.

Армированные плиты получают путем прессования асфальтобетонной смеси совместно с предварительно покрытой битумом стеклотканью или металлической сеткой. Армированные плиты имеют размеры (200...120)×(75...120)×(2...4) см. Асфальтовые плиты иногда применяют для устройства оклеечной гидроизоляции и заполнения деформационных швов.

Асфальтовые армированные маты изготовляют на основе стеклоткани, предварительно пропитанной битумом, с последующим покрытием с обеих сторон слоем битума или гидроизоляционной мастики. В зависимости от вида пропиточного материала и покровного слоя такие маты разделяют на обычные и с повышенной теплостойкостью. Их производят в виде плит длиной 3...10 м, шириной до 1 м и толщиной 4...6 мм.

Асфальтовые армированные маты применяются в основном для устройства оклеечной гидроизоляции.

Гидроизоляционные камни могут быть получены путем пропитки штучных изделий из пористых материалов (кирпича, бетона, туфа, опоки, мела) битумом, дегтем, петралатумом и другими органическими гидрофобизирующими веществами.

Применяются битумированные кирпичи для устройства гидроизоляции в виде кладки и футеровки на цементном или асфальтовом растворе.

10.3. Герметизирующие материалы

В процессе развития строительства зданий различного назначения возникла проблема герметизации стыков. Негерметично заделанные стыки способствуют проникновению влаги. Заделывать швы цементным раствором неэффективно, так как он при твердении уменьшается в объеме, вследствие чего в нем возникают растрескивающие напряжения; при самых малых вибрациях и температурном воздействии в цементном уплотнении появляются трещины, нарушающие герметизацию.

Герметизирующими называют строительные материалы, предназначенные для придания стыкам строительных кон-

струкций непроницаемости. Герметики, кроме водо- и атмосферостойкости, должны обладать упругими свойствами и хорошей адгезией (прилипаемостью) к бетону и сохранять эти свойства неопределенно долго, в идеале — на весь срок эксплуатации сооружения.

Герметики — это композиции на основе полимеров, главным образом полисульфидных или кремнийорганических жидких каучуков. Используются для заполнения различных щелей, трещин и деформационных швов.

По химическому составу герметики подразделяются:

- на акриловые — неотверждающиеся;
- силиконовые — отверждающиеся;
- полиуретановые — отверждающиеся.

По степени отверждения герметики делятся на две группы:

- на нетвердеющие, сохраняющие пластичность в процессе эксплуатации;
- отверждающиеся, образующие резиноподобный высокоэластичный материал.

Для всех перечисленных герметиков существует своя специфика применения.

Акриловые герметики применяются для заполнения швов и трещин между бетонными и каменными поверхностями. Они достаточно долго сохраняют свою эластичность, выдерживают сильную вибрацию. Акриловые герметики имеют хорошую адгезию с бетоном, кирпичом, древесиной, штукатуркой и др., поэтому легко поддаются покраске и штукатурке.

Эти уплотнительные материалы высыхают в течение 15 мин, образуя пленку. Акриловые герметики после нанесения сохраняют свои свойства в интервале температур от −25 до +80 °С, имеют хорошую устойчивость к свету и ультрафиолетовым лучам, огнестойкие, не содержат в своем составе растворителей. Они максимально эффективны для применения как внутри, так и снаружи строений, применяются в основном при герметизации трещин с небольшой деформацией.

Полиуретановые герметики представляют собой эластичную, клеящую, уплотняющую массу на полиуретановой основе, сохраняющую свою эластичность долгое время. Эти

герметики могут применяться для склеивания и герметизации любых материалов: металла, древесины, камня, лакированной жести, пластмассы, керамики, бетона. Полиуретановые герметики имеют хорошую адгезию и обеспечивают прочное склеивание поверхностей, не разрушаемое даже при сильных землетрясениях (до 5 баллов). Они характеризуются следующими свойствами:

- обладают стойкостью против коррозии;
- затвердевают при реакции с водой;
- поддаются окраске, легко покрываются лаком;
- имеют короткое время отверждения (быстро схватываются).

10.4. Лакокрасочные материалы

Лакокрасочными называют материалы, наносимые в вязкожидком состоянии тонким слоем на поверхность изделий или конструкций и образующие после высыхания твердые покровные пленки.

Лакокрасочное покрытие состоит из нескольких слоев: грунтовки, шпатлевки, красочного состава, лака (рис. 10.1). Грунтовки и шпатлевки служат для подготовки поверхности к окраске. Красочные составы образуют покрытие нужного цвета. Лаки создают блестящую пленку.

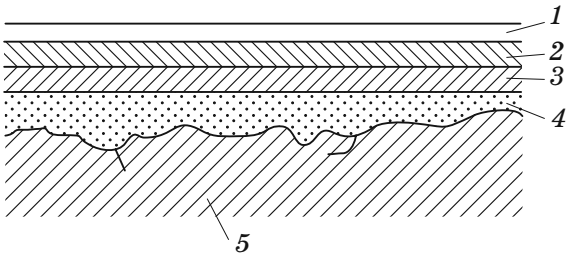


Рис. 10.1. Схема лакокрасочного покрытия:
1 —лак; *2* —красочный состав; *3* — шпатлевка; *4* — грунтовка; *5* — поверхность под покраску (основа)

В состав лакокрасочных материалов входят связующие (пленкообразующие) вещества, пигменты, растворители и разбавители.

Лакокрасочные материалы применяют для защиты основного материала от воздействия агрессивных сред (например, покраска металлического моста), получения красивой окрашенной поверхности, улучшения санитарно-гигиенических условий в помещениях и т.д.

Обязательными компонентами красочных составов являются связующие вещества и пигменты. В состав некоторых строительных красок входят также растворители, разбавители, пластификаторы, наполнители, сиккативы (вещества, хорошо растворимые в растительных маслах и служащие катализаторами их высыхания).

10.4.1. Связующие (пленкообразующие) вещества

Связующими в красочных составах служат вещества, обеспечивающие сцепление частиц пигмента между собой и способные образовывать прочные пленки толщиной от размеров молекулы до сотен микрометров.

Высокомолекулярные пленкообразующие вещества подразделяют на *непревращаемые* (пленки образуются из раствора в результате испарения растворителя) и *превращаемые* (образование пленок сопровождается переходом линейных молекул в трехмерные пространственные полимеры). К первым относятся низкомолекулярные природные смолы, синтетические термопластичные смолы; ко вторым — высыхающие растительные масла.

Растительные масла в лакокрасочных составах применяют преимущественно в виде натуральных, полунатуральных и искусственных олиф.

Натуральные олифы получают путем варки льняного или конопляного масла при температуре до 200 °С. Для ускорения высыхания олифы в процессе варки масел в них добавляют сиккативы. Таким образом, при изготовлении натуральной олифы осуществляется процесс полимеризации исходного мономера. Образование пленок на окрашенной поверхности про-

исходит вследствие окисления кислородом воздуха тонкого слоя олифы. Пленка олифы после окисления становится устойчивой по отношению к веществам, растворяющим олифу.

Полунатуральные олифы получают обработкой растительных масел нагреванием до полимеризации или продуванием воздуха. Для придания полученным вязким продуктам необходимой жидкой консистенции их разбавляют органическими растворителями.

Полунатуральные олифы выпускают следующих наименований: олифа полимеризованная, олифа-оксоль, оксоль-смесь. Они содержат до 55 % уплотненных масел и 45 % растворителя. Полунатуральные олифы в настоящее время наиболее широко применяются в строительстве.

Искусственные олифы — это связующие, получаемые химической обработкой различных органических веществ. Они не содержат растительных масел или содержат их не более 35 %. Из большого ассортимента искусственных олиф в строительстве применяют следующие виды:

- глифталевая — раствор глифталевой синтетической смолы в органических растворителях с некоторым количеством (до 35 %) растительных масел;
- олифа-карболь — раствор органических кислот в уайт-спирите или других легких растворителях.

Лаки представляют собой растворы природных или синтетических смол в легких растворителях. Их разделяют на масляно-смоляные, синтетические, канифольные, битумные, пековые. Масляно-смоляные лаки — это растворы в органических растворителях синтетических смол, модифицированных высыхающими маслами. Синтетические лаки — растворы синтетических смол в органических растворителях. Наибольшее применение в строительстве нашли перхлорвиниловый и другие синтетические лаки.

10.4.2. Пигменты

Пигменты — это окрашенные химические соединения, способные в порошкообразном состоянии смешиваться с жидкими связующими и образовывать красочные составы.

Различают пигменты минеральные (искусственные и природные) и органические. В строительстве используют главным образом минеральные пигменты, обладающие большой химической стойкостью, атмосферо- и светостойкостью, что особенно важно при покрасках наружных частей зданий и сооружений.

Пигменты характеризуются укрывистостью, красящей способностью, тонкостью помола, свето-, атмосферо- и огнестойкостью.

Укрывистость, или *кроющая способность*, характеризуется количеством пигмента в красящем составе, способным перекрыть цвет 1 $м^2$ поверхности.

Красящая способность — это интенсивность окраски, характеризующаяся минимальным количеством пигмента, необходимым для придания белой окраске цветного тона. От красящей способности пигмента зависит его расход для получения тона в красочном составе.

Светостойкость характеризует способность пигмента сохранять свой цвет под действием света; по изменению окраски судят о степени светостойкости пигмента.

Минеральные природные пигменты включают в себя белые (мел, каолин), желтые (охра, сиена), красные (сурик железный, мумиё), коричневые (умбра), серые (графит) пигменты. *Мел* и *каолин* отмученные применяют в красящих составах на клеевых, казеиновых, силикатных и известковых связующих; их также используют в качестве наполнителя грунтовок и шпатлевок. *Охра* — природный пигмент, состоящий из глин и окиси железа от 10 до 25 %. Она свето- и щелочестойкая, применяется в масляных, клеевых, эмалевых и других составах. *Сиена натуральная* отличается от охры повышенным содержанием окиси железа (35...70 %). *Сурик железный* ($Fe_2O_3 \cdot FeO$) — светостойкий пигмент, обладающий антикоррозионными свойствами, применяется для окраски металлических крыш.

Минеральные искусственные пигменты бывают белые (свинцовые, цинковые, титановые белила), красные (сурик свинцовый), желтые (крон свинцовый), черные (сажа), синие (ультрамарин, лазурь), зеленые (оксид хрома) и др.

Свинцовые белила очень укрывисты, свето- и атмосферостойки, обладают высокими антикоррозионными свойствами. Недостатком их является токсичность. *Цинковые белила* обладают хорошей укрывистостью, неядовиты, светостойки и сравнительно щелочестойки.

Сурик свинцовый (Pb_3O_4) имеет цвет от оранжевого до красного. Он обладает стойкостью к действию щелочей, но в кислотах растворяется; хорошо защищает от коррозии.

Ультрамарин — искусственный синий пигмент, обладающий средней светостойкостью. Он щелочестоек, его применяют в основном для подцветки белых масляных и побелочных клеевых красок (для устранения их желтого оттенка).

Оксид хрома (Cr_2O_3) — пигмент зеленого цвета; обладает абсолютной стойкостью к действию света и большой стойкостью к действию высоких температур. Его применяют для приготовления всех видов красок.

10.4.3. Растворители и разбавители

Растворители — жидкие среды, в которых растворимое вещество равномерно распределяется в виде молекул или ионов. Они не вступают в химическое взаимодействие с растворяемым веществом и должны быть достаточно летучими, легко испаряться при высыхании раствора. Органические растворители предназначены для масляных красок и лаков, глифталевых и битумных веществ, эпоксидных, перхлорвиниловых и нитроцеллюлозных лаков и красок.

Скипидар — слабоокрашенная или бесцветная жидкость с характерным запахом — продукт деструктивной (без доступа воздуха) перегонки смолистой древесины (древесный скипидар) или разгонки смолы хвойных деревьев (живичный скипидар). К основной характеристике скипидара относится его нетоксичность, что позволяет использовать его для внутренних отделочных работ.

Скипидар является растворителем средней активности и применяется для разведения масляных, алкидных и других лакокрасочных составов. Следует помнить, что он легко воспламеняется и взрывоопасен.

Уайт-спирит — слегка окрашенная жидкость — продукт перегонки нефти, средняя фракция между тяжелым бензином и тракторным керосином. Вследствие доступности и нетоксичности его широко используют для малярных работ при внутренней и наружной отделке. Он применяется для растворения масляных лаков и красок, а также для смывки ранее нанесенных затвердевших пленок масляных лаков и красочных составов. Растворяющие свойства уайт-спирита ниже, чем у скипидара.

Технический ацетон — бесцветная, прозрачная, легколетучая жидкость с характерным запахом, смешивающаяся с водой и спиртом в различных соотношениях. Ацетон получают при сухой перегонке древесины или синтетическим путем. Он является хорошим растворителем многих органических веществ, в том числе жиров и некоторых синтетических полимеров, благодаря чему широко применяется в лакокрасочной промышленности.

Сольвент каменноугольный — прозрачная бесцветная жидкость — продукт коксохимического производства, получаемый в процессе ректификации фракций сырого бензола. Этот растворитель часто используется для разведения перхлорвиниловых, глифталевых и битумных лаков и красок в смеси с уайт-спиритом.

Разбавители — жидкости, не растворяющие пленкообразующие вещества, а лишь уменьшающие вязкость красочных веществ. В отличие от растворителей они могут содержать связующие вещества. Разбавителями служат олифы или масляные эмульсии типа «вода в масле».

10.4.4. Масляные краски

Масляными красками называют красочные суспензии пигментов в олифе, в состав которых вводят также наполнители. По консистенции масляные краски подразделяются на *густотертые* и *готовые к употреблению*. Для получения густотертых красок пигменты тщательно растирают с олифой в специальных краскотерочных машинах, чтобы все частицы пигмента были покрыты пленкообразующим веществом. Перед использованием густотертые краски разводят олифой до рабочей консистенции.

Масляные краски применяют при защите стальных конструкций от коррозии, деревянных элементов от увлажнения, а также для окраски периодически увлажняемых поверхностей.

Состав масляных красок выбирают в зависимости от их назначения. Так, в масляные краски, предназначенные для антикоррозионной защиты открытых металлических конструкций (мостов, мачт и др.), вводят пигменты, содержащие соединения свинца (например, свинцовый сурик, свинцовые белила, крон свинцовый и др.), так как вследствие их взаимодействия с жирными кислотами олифы образуют нерастворимые в воде свинцовые мыла, повышающие прочность и водостойкость покрытия. К тому же пигменты, содержащие соединения свинца, обладают высокой атмосферостойкостью и характеризуются хорошим сцеплением со сталью.

Наибольшей атмосферостойкостью и долговечностью обладают красочные составы на натуральных олифах. Красочные составы на искусственных олифах значительно дешевле, но менее атмосферостойки, поэтому их применяют преимущественно для окраски внутренних частей зданий (за исключением полов).

10.4.5. Эмалевые краски

Эмалевыми называют краски, приготовленные растиранием пигментов с различными лаками, в частности с масляным. Густотертые эмалевые краски разводят до рабочей консистенции жидким лаком с добавлением сиккатива и растворителей. После высыхания эмалевые красочные составы образуют блестящую пленку. В качестве пигментов в состав эмалевых красок вводят цинковые, титановые и литопонные* белила, кроны, ультрамарин, сажу, железный сурик и некоторые органические пигменты.

По виду связующего эмалевые краски разделяют:

- на масляные — на масляных лаках;
- нитроэмали — на нитроцеллюлозных лаках;

---

* Литопон — белый порошок, смесь пигмента ZnS и наполнителя $BaSO_4$. Применяется для приготовления различных красок.

- глифталевые — на глифталевых лаках;
- перхлорвиниловые и т.п.

Пленки эмалевых красок на масляных лаках, отвердевшие без нагревания, при длительном воздействии влаги постепенно разрушаются, поэтому эти краски применяют только для внутренних работ. Нитроэмали применяют как для внутренней окраски помещений с температурой не выше 40 °С, так и для наружных работ (нитроглифталевые эмали). Перхлорвиниловые эмалевые краски образуют водо- и атмосферостойкие пленки и применяются для окраски фасадов зданий.

10.5. Акустические материалы

Вдоль автомобильных дорог часто расположены жилые постройки, требующие защиты от неблагоприятных шумовых воздействий транспортных потоков. В этих случаях устраивают шумовые экраны с применением акустических материалов.

10.5.1. Общие положения

Акустические материалы делятся на два вида:

- звукопоглощающие,
- звукоизоляционные.

Звукопоглощающие материалы в дорожной отрасли используют главным образом в конструкциях звукопоглощающих экранов, а также в качестве звукопоглотителей для снижения звукового давления в помещениях производственных и общественных зданий.

Эффективность звукопоглощения тесно связана со структурными характеристиками и толщиной материала (h).

Наиболее распространенными звукопоглощающими материалами являются:

- минераловатные плиты с жестким скелетом на синтетическом или крахмальном связующем (минераловатные изделия). Минераловатные плиты на крахмальном связующем

изготовляют путем подпрессовки и тепловой обработки минераловатного ковра, пропитанного крахмальным клеем и разрезанного на полосы. В качестве связующего используют состав (% по массе): крахмал — 9,5, мазут — 2,4, парафин — 0,70, вода — 87,4;

- плиты и маты на основе волокон из минеральной ваты, пропитанные связующим и скрепленные прошивкой нитями через обкладки из эластичных материалов;
- минераловатные плиты на битумном связующем. Такие плиты менее прочны и имеют более высокую плотность, чем изделия на синтетическом связующем, но при этом обладают высокими гидрофобными свойствами. Поэтому их применяют в основном для теплоизоляции холодильников.

Классификация звукопоглощающих материалов и изделий возможна по многим признакам. Лучшей является классификация, в основе которой лежит механизм поглощения звуковой энергии:

- пористые материалы и конструкции;
- мембранные материалы и конструкции;
- резонаторные конструкции.

ГОСТ 23499–79 классифицирует звукопоглощающие строительные материалы по назначению, форме, жесткости, возгораемости (горючести) и структуре. Данная классификация является достаточно полной с точки зрения применения звукопоглощающих материалов.

Проблема борьбы с шумом на автомобильных дорогах и уличных магистралях в городах остается по-прежнему актуальной. Поэтому поиск эффективных шумозащитных материалов, сочетающих гашение шума с недефицитностью сырья, продолжается.

10.5.2. Теоретические основы распространения и гашения шума (по материалам Б.М. Румянцева)

Создание и эффективное применение звукопоглощающих материалов базируется на закономерностях, отражающих распространение звуковых волн в воздухе, при переходе из воз-

духа в поглощающий материал и в толще поглощающего материала.

Распространение звуковых волн в воздухе. ***Звук*** — это упругие волны, распространяющиеся в газах, жидкостях и твердых телах и воспринимаемые ухом человека. Основными характеристиками звуковой волны являются звуковое давление P и частота колебаний f.

Звуковое давление P зависит от характера источника шума. Звуковые волны в слышимом диапазоне имеют звуковое давление P от $2 \cdot 10^{-5}$ дБ (порог слышимости) до 20 дБ (болевой порог).

Частота колебаний звуковой волны f (Гц) выражается количеством колебаний в секунду:

$$f = \frac{1}{T}, \tag{10.2}$$

где T — период колебаний.

По частоте звуковые колебания делятся:

- на низкие (16...500 Гц);
- средние (500...1000 Гц);
- высокие (1000 Гц и выше).

Человеческое ухо лучше приспособлено к восприятию звуковых колебаний на средних частотах.

Скорость распространения звуковых волн определяется средой. Так, например, скорость звука в воздухе около 340 м/с, воде — 1450, кирпичной кладке — 2000, бетоне — 4000 м/с.

Прохождение звуковой волны из воздуха в поглащающий материал. В месте контакта звуковой волны с преградой имеет место частичное отражение и поглощение звуковой энергии.

Условие прохождения звуковой волны из воздуха в материал характеризуется *входным импедансом* Z (полным сопротивлением) поглощающей поверхности:

$$Z = \frac{P}{\upsilon} = \frac{P_{\text{пад}} + P_{\text{отр}}}{\upsilon_{\text{пад}} - \upsilon_{\text{отр}}}, \tag{10.3}$$

где $P_{\text{пад}}$, $P_{\text{отр}}$ — давление в падающей и отраженной волнах соответственно; $\upsilon_{\text{пад}}$, $\upsilon_{\text{отр}}$ — скорость падающей и отраженной волн соответственно.

В акустике используют также безразмерный импеданс:

$$\overline{Z} = \frac{Z}{W_0}, \qquad (10.4)$$

где W_0 — волновое сопротивление воздуха.

Через безразмерный импеданс определяют *коэффициент звукопоглощения* α:

$$\alpha = 1 - \left[\frac{\overline{Z} - 1}{Z + 1}\right]^2. \qquad (10.5)$$

Из этого уравнения следует, что между коэффициентом звукопоглощения (α) и безразмерным импедансом ($\overline{Z}$) существует тесная связь, так как при $\overline{Z} = 1$ поверхность ограждающего (шумопоглощающего) материала полностью поглощает все падающие на нее звуки ($\alpha = 1$). В этом случае входной импеданс равен волновому сопротивлению воздуха:

$$Z \approx W_{\text{о}} = \rho_{\text{в}} \upsilon_{\text{в}}, \qquad (10.6)$$

где $\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха; $\upsilon_{\text{в}}$ — скорость распространения звука в воздухе при нормальных условиях.

Знание коэффициента звукопоглощения необходимо при разработке эффективных звукопоглощающих материалов.

Распространение звука в материале шумозащитных конструкций. По принятым представлениям, механизм гашения звука в материале заключается в том, что при падении звуковой волны на пористый материал воздух, заключенный в порах, начинает колебаться. Вследствие наличия в порах сопротивления трения и вязкости воздуха часть звуковой энергии превращается в теплоту, при этом за счет теплопроводности стенок пор материала происходит необратимая потеря энергии. Кроме того, при неидеальной упругости материала могут происходить релаксационные потери энергии.

Распространение и гашение звука в пористом материале с учетом сил трения, вызывающих переход звуковой энергии в тепловую, описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dP}{dx} = \frac{X}{\Pi}\rho_{\text{в}}\frac{d\upsilon}{d\tau} + r\upsilon, \qquad (10.7)$$

где x — отклонение от скорости равновесия в момент τ; X — структурный фактор материала ($X = \frac{\rho}{\rho_в}$); П — пористость материала; υ — скорость колебания воздуха; r — удельное сопротивление продуванию.

Из-за особенностей пор в материале (изгибы, изменения поперечного сечения) ρ всегда больше $\rho_в$ и поэтому X всегда больше 1. Наиболее эффективными являются материалы со структурным фактором, близким к единице (например, изделия из минеральной ваты). Структурный фактор материала неразрывно связан с его пористостью П.

При прохождении звуковой волны процесс сжатия воздуха сопровождается теплообменом между воздухом и поверхностью пор. При этом в теплообмене участвуют не только сквозные, но и тупиковые поры. Для учета этого в уравнение (10.7) вводится поправочный коэффициент (в пределах 1...4).

Требуемая толщина звукопоглощающего материала h может быть определена по формулам

$$h = \frac{800}{\sqrt{r\Pi f}}, \qquad (10.8)$$

$$h = \frac{120\sqrt{X}}{r\Pi}, \qquad (10.9)$$

где r — сопротивление продуванию ($r = 10\rho_в \cdot \upsilon_в$, 10^3 Н·с/м^3.

На практике эффективность звукопоглощающих материалов оценивается по коэффициенту звукопоглощения

$$\alpha = \frac{E_{пад} - E_{отр}}{E_{пад}}, \qquad (10.10)$$

где $E_{пад}$ и $E_{отр}$ — соответственно падающая и отраженная энергия звуковой волны.

С учетом требований ГОСТ 23499–79 «Материалы и изделия звукопоглощающие и звукоизоляционные» материалы, в зависимости от значения α, делятся на три класса: I класс — $\alpha > 0{,}8$; II класс — $\alpha = 0{,}4...0{,}8$; III класс — $\alpha = 0{,}2...0{,}4$.

Материалы с $\alpha < 0{,}2$ не относятся к звукопоглощающим. Для объективной оценки коэффициент звукопоглощения определяется для низкочастотного (Н), среднечастотного (С) и высокочастотного (В) диапазонов. При этом к низким относятся частоты 63, 125 и 250 Гц, средним — 500 и 1000 Гц, высоким — 2000, 4000 и 8000 Гц. Принадлежность звукопоглощающего материала или изделия к какому-либо классу обозначается буквенными и числовыми символами (например, НСВ-321, где: Н — низкие частоты, 3 — III класс ($\alpha < 0{,}4$), С — средние частоты, 2 — II класс ($\alpha = 0{,}4...0{,}8$), В — высокие частоты, 1 — I класс ($\alpha > 0{,}8$).

При определении коэффициента звукопоглощения при нормальном (перпендикулярном) падении звука применяется акустический интерферометр.

Большое влияние на звукопоглощение оказывает пористость материала: величина пористости, распределение пор по размерам, преобладающий характер пор. Для оценки возможности применения различных материалов в качестве звукопоглощающих в табл. 10.5 приведены сравнительные данные по их пористости.

Таблица 10.5

Характеристика пористости материалов различной структуры

Структура материала	Материалы	Пористость, %		
		общая	открытая	закрытая
Ячеистая	Ячеистый бетон	85...90	40...50	40...45
	Пеностекло	85...90	2...5	83...85
	Пенопласты	92...94	1...55	45...98
Волокнистая	Минераловатные	85...92	85...92	0
Зернистая	Перлитовые	85...88	60...65	22...25
	Стеклопоровые	92...99	60...65	30...35

Из табл. 10.5 следует, что пористые материалы различной структуры имеют преимущественно одинаковую пористость. Однако эффективнее материалы с волокнистой структурой, обладающие открытой пористостью. Заведомо хуже материалы, имеющие зернистую ячеистую структуру. Под сомнение

ставится целесообразность применения для гашения воздушных звуковых волн пеностекла и пенопласта, имеющих преимущественно закрытую пористость.

На эффективность звукопоглощения влияет не только абсолютное значение открытой пористости, но и размер пор, их форма и распределение. С уменьшением размера пор при сохранении абсолютных значений пористости увеличивается их количество и, следовательно, увеличивается звукопоглощение.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Назовите объекты дорожной отрасли, требующие применения теплоизоляции с целью энергосбережения.

2. Приведите классификацию теплоизоляционных материалов.

3. Дайте примеры **рыхлых и жестких теплоизоляционных материалов.**

4. Охарактеризуйте водопроницаемость бетонов.

5. Что такое агрессивность воды?

6. Какие существуют виды гидроизоляции?

7. Назовите примеры кровельных гидроизоляционных материалов.

8. Что такое герметизирующие материалы?

9. Что представляют собой лакокрасочные материалы?

10. Что представляют собой эмалевые краски?

11. Перечислите виды акустических материалов.

11 СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ

11.1. Общие сведения

Древесина — ткань растений, состоящая из клеток со стенками, проводящими воду и растворенные в ней соли.

Огромные запасы древесины в виде хвойных и лиственных лесов, относительно простая разработка лесных массивов, легкая обрабатываемость дерева явились основными факторами широкого применения древесины с глубокой древности.

Древесина как строительный материал обладает рядом ценных технических свойств:

- высокой прочностью и упругостью;
- малой средней плотностью (что облегчает ее транспортирование и придает небольшой вес деревянным конструкциям);
- способностью удерживать металлические крепления (гвозди, шурупы, скобы).

Однако при этом у древесины есть комплекс отрицательных свойств:

- анизотропность (разница в свойствах по разным направлениям);
- гигроскопичность;
- изменение механических свойств при изменении влажности;
- недостаточная (у отдельных пород) твердость;
- способность к образованию трещин;
- подверженность гниению и повреждению насекомыми;
- легкая воспламеняемость.

Хотя указанные недостатки снижают качество древесины, в современных условиях они в значительной мере устраняются путем применения химических способов консервации древесины и ее защиты от возгорания.

11.2. Строение дерева

Дерево относится к многолетним растениям. В нем различают ствол, ветви, листья и корни. Листья и ветви образуют крону дерева. Корни служат для укрепления дерева в грунте, для всасывания влаги и растворенных в ней минеральных веществ и передвижения их по стволу. Ствол удерживает крону дерева и служит для перемещения воды и солей от корней к листьям, а от листьев — в обратном направлении, к корням, органических веществ, которые частично откладываются в стволе.

Ствол составляет главную массу дерева (от 50 до 90 % объема) и является основной частью с точки зрения использования для строительных целей; корни занимают от 5 до 25 % и ветви — от 5 до 20 % объема дерева. Дерево по мере роста обычно освобождается в нижней части от веток, ствол же увеличивается как в длину, так и в диаметре. Ствол, имеющий форму, приближающуюся к цилиндру, называется *полнодревесным*, а при значительном уменьшении диаметра ствола от комля к вершине — *сбежистым*. Прирост ствола как в длину, так и по диаметру вначале происходит довольно быстро, но после достижения некоторого максимума этот прирост постепенно уменьшается.

Структура древесного ствола отличается значительной неоднородностью. Это подтверждается простым наблюдением невооруженным глазом на главных разрезах ствола (рис. 11.1):

- поперечном (торцовом), проходящем перпендикулярно оси ствола;
- радиальном, проходящем вдоль ствола через его ось;
- тангенциальном, проходящем вдоль ствола на некотором расстоянии от оси (по хорде поперечного сечения).

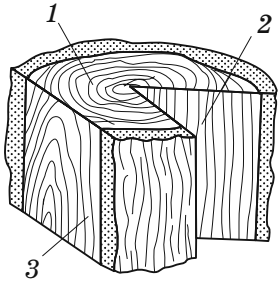


Рис. 11.1. Основные разрезы ствола дерева: *1* — поперечный (торцовый); *2* — радиальный; *3* — тангенциальный

Ствол дерева состоит из многочисленных клеток, вытянутых в основном по его длине. Клетки ствола группируются определенным образом и образуют на торце ствола систему *концентрических колец*. Вместе с другими элементами они формируют макроструктуру древесины.

11.3. Макроструктура древесины

Основными элементами макроструктуры древесины являются (рис. 11.2): кора, луб, камбий, заболонь, ядро, сердцевина.

Функциональная роль каждого элемента макроструктуры древесины описана ниже.

Кора защищает дерево от механических повреждений и внешних температур. Из коры некоторых пород (пробковый дуб, бархатное дерево) изготовляют пробку, теплоизоляционные изделия, дубильные вещества и др.

Луб — тонкая внутренняя часть коры, обычно светлого цвета. Она состоит из ситовидных трубок и лубяных волокон, служит для перемещения органических веществ, выработанных листьями (нисходящий ток).

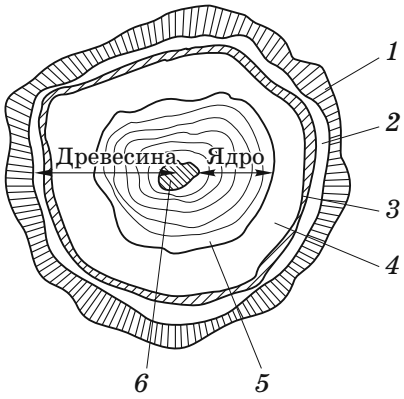


Рис. 11.2. Поперечный разрез ствола дерева:
1 — кора; *2* — луб; *3* — камбий; *4* — заболонь; *5* — ядро; *6* — сердцевина

Камбий — тонкий слой живых клеток, расположенный непосредственно за лубом. Камбий образует механическую ткань, состоящую из толстостенных сплюснутых клеток, которые способны к росту и делению.

Образовавшиеся в течение вегетационного периода слои ранней и поздней древесины называют *годичными слоями* или *кольцами*. По числу годичных слоев можно ориентировочно судить о возрасте дерева.

Далее от камбия к центру идет обычно самый толстый слой древесины — ***заболонь***. Это светлая зона ствола, окружающая ядро. В основном она состоит из живых клеток. По механическим свойствам древесина заболони не уступает древесине ядра, но хуже сопротивляется загниванию.

Ядро — внутренняя зона древесного ствола, большей частью темноокрашенная. Оно образуется в результате отмирания живых клеток древесины. Темная окраска ядра объясняется отложением в клетках древесины смолы, дубильных и красящих веществ, углекислого кальция. Эти вещества увеличивают стойкость ядра против загнивания.

Породы, имеющие заболонь и ядро, называют *ядровыми* (дуб, сосна, лиственница, тополь, каштан, кедр и др.). Более сухую центральную часть древесины таких пород называют *спелой древесиной*.

Если древесина центральной части ствола ничем не отличается от периферийной (например, у березы, ольхи, граба, клена и др.), то такие породы называют *заболонными*. В раннем возрасте древесина всех пород имеет только заболонь.

Ядровая и спелая древесина обладает более высокими техническими свойствами, чем заболонная.

Сердцевина расположена в центральной части ствола по всей его высоте. Она состоит из крупных тонкостенных клеток, имеет рыхлое строение и является наиболее слабой частью ствола, склонной к загниванию. Для накопления и проведения питательных веществ в поперечном направлении служат сосудисто-волокнистые ткани, которые называются *сердцевинными лучами*.

Изучение макроструктуры древесины дает представление о ярко выраженной анизотропии ее свойств.

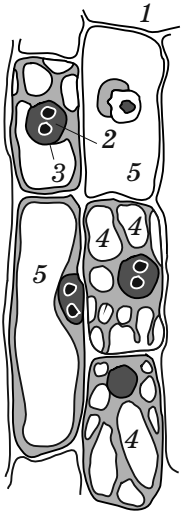
11.4. Микроструктура древесины

В древесине на долю оболочек клеток приходится около 95 % массы. Оболочки клеток древесины на 99 % сложены из органических соединений, представленных у хвойных пород примерно на 70 % углеводами, у лиственных — на 80 %.

Углеводы — природные вещества, образованные тремя элементами: углеродом, водородом и кислородом. Примерами простых углеводов являются глюкоза и сахар.

Средний элементарный состав абсолютно сухой древесины всех пород следующий: углерод — 49,5 %, водород — 6,3, кислород + азот — 44,2, минеральные вещества (преимущественно соли кальция) — 0,2...0,7 %.

Каждая клетка древесины представляет собой сложное образование (рис. 11.3). Она состоит из оболочки *1* и находящейся в ней протоплазмы *2*. Внутри протоплазмы обычно находится одно ядро *3* (встречаются и многоядерные клетки). В процессе роста клетки протоплазма расходуется и в ней образуются полости (вакуоли) *4*, которые заполняются клеточным соком. В дальнейшем отдельные вакуоли постепенно сливаются в одну общую и оттесняют протоплазму к оболочке клетки. Кроме протоплазмы, ядра и вакуолей с клеточным соком, в клетках находятся еще так называемые ***пластиды*** *5* — бесцветные или окрашенные образования.



Протоплазма представляет собой зернистую, прозрачную, тягучую слизь (растительный белок). *Ядро* обычно имеет овальную форму, в нем находится одно или несколько блестящих ядрышек и тонкие нитеобразные белковые вещества, которые называются *хроматинами*. Ядро, так же как и протоплазма, состоит из сложного белкового соединения.

Рис. 11.3. Клетки древесины:
1 — оболочка; *2* — протоплазма; *3* — ядро; *4* — вакуоли; *5* — пластиды

Пластиды в зависимости от окраски делятся на *лейкопласты* — бесцветные пластиды, *хромопласты* — с желтым и оранжевым пигментом и *хлоропласты*, содержащие зеленый пигмент, который называется *хлорофиллом*. Хлорофилловые зерна находятся преимущественно в листьях и под влиянием солнечных лучей превращают углекислый газ воздуха в различные органические соединения (углероды, белки, жиры). Растения, лишенные хлорофилла, сами не могут вырабатывать органические соединения, необходимые им для жизни растения, и поэтому вынуждены паразитировать.

Клеточный сок, заполняющий вакуоли, представляет собой водный раствор различных веществ: углеводов, пигментов, дубильных веществ и свободных органических кислот.

Оболочка клетки в основном состоит из ***целлюлозы*** или клетчатки $(C_6H_{10}O_5)n$; степень полимеризации n достигает значений от 300 до 6000 и более.

Целлюлоза — линейный гетероцепной однородный полимер, имеющий большое число гидроксильных групп (ОН), образующих водородную связь. Эта связь между водородным атомом гидроксила одной цепи и кислородным атомом гидроксила соседней цепи придает полимеру повышенную жесткость, так как способствует сращиванию цепных молекул в целлюлозных волокнах. Кроме водородных связей, для целлюлозы характерно также внутри- и межмолекулярное взаимодействие, т.е. силы Ван-дер-Ваальса, что, наоборот, уменьшает степень жесткости, и молекулы целлюлозы могут принимать различные расположения.

Древесные целлюлозные волокна имеют спиральную структуру и содержат примерно 55...65 % кристаллической и 25...35 % аморфной (гемицеллюлозной) части, причем у хвойных пород аморфной части меньше, чем у лиственных (28...35 %).

Являясь основным веществом древесины, целлюлоза образует в структурном отношении слоистую клеточную оболочку (стенку), способную при механической обработке распадаться на тонкие целлюлозные волоконца — *фибриллы*, а при химической — на *микрофибриллы*. Фибрилла имеет кристаллическую структуру, так как для нее типичным является

регулярное расположение молекул, характерное для молекулярной кристаллической решетки. Микрофибриллы также в основном сохраняют кристаллические (ориентированные) области.

В клеточной оболочке наблюдается слоистость. Материал оболочки образуется за счет распада протоплазмы, поэтому по мере роста клетки количество протоплазмы в ней уменьшается. Более старая оболочка клетки содержит большее количество минеральных веществ. По мере окончания роста клетки происходит постепенное утолщение оболочки за счет нарастания последующих слоев. Иногда утолщение бывает настолько велико, что внутри клетки оболочка имеет тонкие поры. Оболочка претерпевает различные изменения в строении и составе, в результате чего происходит ее одеревенение, или опробкование, или ослизнение.

При одеревенении в оболочке клетки образуется особое вещество — ***лигнин***, который содержит значительное количество углерода; увеличиваются также прочность и твердость, но уменьшаются упругость, способность к разбуханию и пр. Одеревенение клеток происходит преимущественно в стволе.

Лигнин — природный полимер, представляющий собой высокомолекулярную ароматическую часть, количество которой в древесине хвойных пород до 28...30 %, лиственных — 18...24 %. Существование лигнина было открыто более 145 лет назад, но его весьма сложное строение до сих пор остается не полностью выясненным. Полагают, что это смесь нерегулярных разветвленных полимеров сетчатой структуры. От целлюлозы лигнин отличается повышенным содержанием углерода — 60...65 % по сравнению с 4 % в целлюлозе.

В химическом отношении лигнин — реакционноспособный полимер. По сравнению с целлюлозой лигнин обладает меньшей стойкостью — он легче окисляется.

Оба основных компонента древесины (целлюлоза и лигнин) взаимодействуют между собой на химическом уровне.

Клеточная структура древесины в первом приближении представляет собой конструкционное сочетание целлюлозы с лигнином. Волокна целлюлозы обладают высокой прочностью на разрыв, но легко изгибаются. Лигнин объединяет их

в единое целое с помощью водородных и ван-дер-ваальсовых сил связи и когезии, поэтому в совокупности древесина по существу является природным органическим материалом с конгломератным типом структуры, в котором имеются матричная пространственная сетка из лигнина и кристаллический волокнистый наполнитель в виде целлюлозы. Оба этих компонента, как уже отмечалось, теснейшим образом взаимосвязаны и представляют природный композиционный материал (конгломерат). Эта структура хорошо видна, например, на микроснимке среза осины при увеличении в 11 000 раз, полученном американским ученым Э. Келли (рис. 11.4).

Подобно искусственным конгломератам, древесина содержит капилляры и поры различных размеров; в период жизни дерева они имеют большое значение для передвижения воды и питательных соков, их накопления и пр. Крупные капилляры являются полостями и порами стенок, тонкие и мельчайшие капилляры и поры находятся между фибриллами, микрофибриллами и вокруг микрофибрилл.

Если в крупных капиллярах удельная площадь внутренней поверхности невелика, (например, у ели около 0,2 $м^2/г$), то у мельчайших пор она очень большая (например, у ели при диаметрах капилляров $10 \cdot 10^{-8}...10 \cdot 10^{-7}$ см (от 10 до 100 Å) она составляет до 300 $м^2/г$). Такое различие капилляров от-

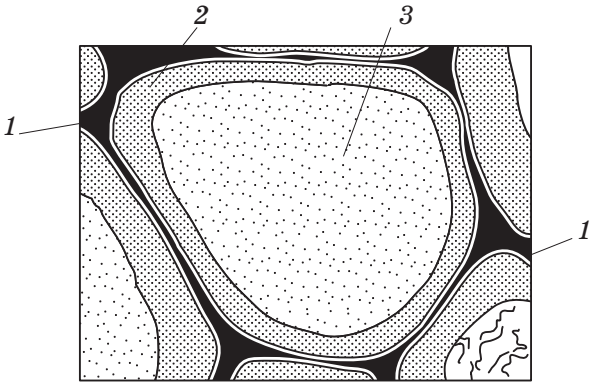


Рис. 11.4. Электронная микрофотография среза осины (×11 000): *1* — лигнин; *2* — стенка целлюлозной клетки; *3* — полость клетки

ражается на характере их контакта с водой. Крупные капилляры могут заполняться водой, которая мало влияет на состояние древесины и ее качество как строительного материала. Эта влага сравнительно легко приходит в капилляры и поры, особенно при контакте дерева с водой, заполняет полости и может составлять до 100...200 % к массе абсолютно сухой древесины, но она также сравнительно быстро и легко удаляется из них при сушке. Тонкие поры и капилляры заполняются не только при контакте с водой, но и в условиях влажного воздуха в связи с гигроскопичностью древесины по законам капиллярных сосудов. Гигроскопическая влага сорбируется на стенках клеток, частично переходя в коллоидно-связанную с веществом дерева. Предельное насыщение древесины гигроскопической влагой составляет 25...35 % (в среднем 30 %) к массе абсолютно сухой древесины и называется *пределом насыщения клеточных стенок*. Насыщение гигроскопической влагой до этой предельной точки сопровождается набуханием древесины, изменением (ухудшением) ее физических и механических свойств. Увеличение влаги после 30%-ного ее содержания на механические свойства древесины почти не влияет; не увеличивается и ее объем за счет набухания.

Опробкование сопровождается образованием в оболочке клетки вещества, более бедного кислородом, чем лигнин. В результате опробкования клетка хорошо противостоит гниению и становится непроницаемой для воды и газов. Опробкованию обычно подвергаются клетки на поверхности растения.

Ослизнение сопровождается превращением всей оболочки или части ее в камедь, или слизь, которая растворяется в воде. Если ослизняется часть оболочки, то в ней появляются отверстия, которыми клетки соединяются между собой, образуя сосуды.

Хотя клетки плотно прилегают друг к другу и соединены между собой межклеточным веществом, между ними образуются межклеточные пространства, заполняющиеся выделениями клеток (например, у хвойных пород — смолой). Кроме

смоляных ходов, могут быть воздухоносные межклеточные ходы.

Небольшую часть древесины (2...4 %) составляют ***экстрактивные вещества.*** Они не входят в состав клеточной стенки, а способны лишь пропитывать ее. Экстрактивные вещества в основном содержатся в полостях клеток и межклеточном пространстве. В отличие от углеводов и лигнина экстрактивные вещества — низкомолекулярные соединения, которые извлекаются из древесины нейтральными растворителями — водой, обычными органическими растворителями. Хотя их немного, они придают древесине цвет, запах, вкус, иногда токсичность, помогают дереву сопротивляться гниению, поражению грибами и т.д. Среди экстрактивных веществ — смолы и смоляные кислоты, танниды (дубители), эфирные масла, красители, камеди, белки и др. В каждой породе присутствуют свои экстрактивные вещества, по-разному распределяясь внутри дерева. Так, содержание смол в лиственных породах — до 1 %, а в хвойных может быть до 20 %.

11.5. Характеристика древесины основных пород, применяемых в строительстве

Древесные материалы, которые применяются в строительстве, изготовляют из различных древесных пород. Лесные насаждения, состоящие из лиственных пород, называются *черным лесом* (*чернолесьем*), из хвойных пород — *красным лесом* (*краснолесьем*). Насаждения, имеющие лиственные и хвойные породы, называются *смешанными*.

Древесные породы делятся на две главные группы:

- хвойные породы;
- лиственные породы.

В дорожном и аэродромном строительстве в качестве строительных материалов чаще применяются хвойные породы ввиду большей их распространенности и более высоких технических свойств.

Хвойные породы. Хвойные породы имеют листья в виде игл, которые сохраняются и зимой. Наибольшее практическое значение для строительства имеют сосна, ель, лиственница, кедр и пихта.

Древесина хвойных пород обладает меньшей плотностью, по сравнению с лиственными, и легче обрабатывается. Она имеет резко выраженные очертания годичных слоев, повышенную смолистость и стойкость против загнивания.

Хвойные породы обычно имеют правильную форму ствола, что позволяет полнее использовать их в строительстве.

Сосна — ядровая порода. Цвет ядра розовый, желтоватый или буроватый, особенно выделяется при высыхании древесины; заболонь — желтовато-белого цвета. Древесина сосны мягкая, легкая, упругая, хорошо колется. Продолжительность жизни сосны до 300 лет. Лучшую древесину она дает в возрасте 80...120 лет. Древесину сосны широко применяют в различных областях строительства: в мостостроении, для изготовления столбов, досок, шпал, столярных изделий, опалубки и т.д.

Ель — порода спелодревесная. Древесина ели белого цвета с блеском и широкой заболонью, мягкая, легкая, менее смолистая, чем у сосны, поэтому относительно быстрее загнивает. Древесина ели трудно обрабатывается из-за большого количества сучков, плохо пропитывается. Продолжительность жизни ели до 250...300 лет, лучший возраст для рубки — 100...150 лет. Ввиду большого распространения ель широко используют в строительстве, несмотря на более низкие, по сравнению с сосной, физико-механические свойства.

Лиственница — ядровая порода с красновато-бурым ядром и узкой заболонью белого цвета с буроватым оттенком. Древесина лиственницы мелкослойная, плотная, тяжелая, прочная, твердая, обильно пропитана смолой. Она мало коробится и трескается при высыхании, стойкая против загнивания, не поражается насекомыми, хорошо сохраняется на воздухе и под водой, причем, находясь продолжительное время под водой, увеличивает свою механическую прочность.

Лиственница — быстрорастущая порода и уже к 60...80 годам достигает полного развития. Ее применяют в различных областях строительства: в мостостроении, гидротехническом строительстве, для изготовления столбов, шпал, фанеры.

Кедр (сибирский) — ядровая порода с желтовато-красным ядром и тонкой желтовато-бурой заболонью; мягкая и довольно прочная. Ствол кедра прямой, высокий, правильный. Продолжительность жизни около 700 лет. Кедр распространен главным образом в Сибири. По качеству древесина кедра близка к древесине сосны.

Пихта — безъядровая порода. Древесина пихты мягкая и слабее, чем у других хвойных пород. Это самое легкое дерево в России. Родина пихты — Сибирь. В Европейской части России пихта встречается на Урале и в северо-восточных областях. По техническим свойствам древесина пихты близка к древесине ели и применяется в строительстве для тех же целей, что и ель.

Лиственные породы. По запасам древесины лиственные породы уступают хвойным и составляют около четверти площади всех лесов. Однако они превосходят их многочисленностью пород, разнообразием свойств, областью применения.

Дуб — ядровая порода. Растет в средней и южной полосе. Средняя продолжительность жизни дуба 500...600 лет. Древесина плотная, прочная и упругая, с хорошо развитыми сердцевинными лучами. При высыхании она обладает значительной усушкой и склонна к образованию трещин; хорошо сохраняется на воздухе и под водой. Дуб, находящийся длительное время под водой, приобретает большую твердость, при этом древесина его чернеет под влиянием взаимодействия дубильной кислоты с солями железа, находящимися в воде.

Древесину дуба, обладающую высокими механическими свойствами, применяют в мостостроении, гидротехническом строительстве, для изготовления конструкций зданий, шпал, паркета, различных отделочных работ, изготовления мебели, фанеры и др.

Вяз — ядровая порода. Ядро серое, бурое, заболонь широкая светло-желтая. Древесина тяжелая, прочная, упругая, средней твердости и хорошо сопротивляется ударной нагрузке. Особой прочностью отличается в сооружениях под водой; на воздухе сохраняется хуже. Вяз применяют в гидротехнических сооружений, для изготовления облицовочной фанеры и др.

Береза — порода с твердой и тяжелой древесиной белого и желтоватого цвета. Древесина березы вязкая, довольно прочная, но малоустойчива против загнивания, медленно сохнет и легко коробится. Древесину березы применяют для изготовления мебели, фанеры, токарных изделий.

Осина. Ее древесина легкая и мягкая, белого цвета с бледно-зеленоватым оттенком. В сухой среде осина довольно прочна, но во влажном состоянии быстро загнивает. Осину применяют для изготовления фанеры, гонта (тонких дощечек для кровель), спичек, тары и пр.

Клен (остролистный) — древесина белого, красноватого или желтого цвета с шелковистым блеском и красивым рисунком, часто встречаются темные или цветные пятна, являющиеся признаком загнивания древесины. Древесина клена прочная, плотная, мало коробится, почти не трескается при высыхании и хорошо обрабатывается; при переменной влажности склонна к загниванию. Клен применяют для отделочных работ, изготовления токарных изделий, изготовления облицовочной фанеры и т.д.

Бук имеет тяжелую, твердую древесину белого цвета с красноватым оттенком и многочисленными широкими серцевинными лучами более темного цвета. Его используют в строительстве для изготовления свай, фанеры, паркета.

Граб — древесина твердая, тяжелая, вязкая, белого цвета, трудно раскалывается. На открытом воздухе древесина граба сравнительно быстро загнивает. В строительстве граб находит ограниченное применение.

Примерные сроки службы древесины различных пород (по Юргенсу) приведены в табл. 11.1 (условный срок службы дуба принят за единицу).

Таблица 11.1

Сроки службы древесины

Древесная порода	Срок службы, усл. ед.	
	на воздухе	в воде
Дуб	1,0	1,0
Береза	0,15...0,4	Не применяется
Бук	0,1...0,6	0,7...1,0
Вяз	0,6...0,9	0,9
Ель	0,4...0,67	0,5
Ива	0,3	Не применяется
Лиственница	0,4...0,85	0,5
Ольха	0,2...0,4	1,0
Осина	0,2...0,4	Не применяется
Сосна	0,4...0,85	0,8

11.6. Свойства древесины

Технические свойства древесины зависят от ее состава и строения. Физические и механические свойства в большей или меньшей степени обусловливают другие свойства древесины, поэтому им уделяется основное внимание.

11.6.1. Физические свойства древесины

К физическим свойствам древесины относят:

- плотность (истинную и среднюю);
- влажность;
- пористость;
- гигроскопичность;
- водопоглощение;
- теплопроводность;
- звукопроницаемость;
- теплотворную способность.

Истинная плотность ($\rho_и$) различных пород примерно одинакова: 1499...1584 кг/м^3 (в среднем 1540 кг/м^3), что объясняется одинаковым химическим составом древесины разных пород.

Средняя плотность (ρ_w) колеблется в широких пределах. Она зависит от породы дерева, пористости, влажности древесины и других факторов.

Для сравнения плотность древесины пересчитывается при влажности 12 %. Так, средняя плотность, определенная при стандартной 12 % влажности, равна для древесины, кг/м^3: сосны — 500, ели — 450, липы — 500, березы — 630, бука — 670, дуба — 690, клена — 700.

Средняя плотность изменяется в зависимости от влажности древесины (W).

Влажность древесины W выражается в процентах от массы сухой древесины и вычисляется по формуле

$$W = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100, \qquad (11.1)$$

где m_2 — масса влажной древесины, г; m_1 — масса абсолютно сухой древесины, г.

Среднюю плотность древесины с фактической влажностью W пересчитывают на стандартную влажность (12 %) следующим образом:

$$\rho_{012} = \rho_w[1 + 0{,}01(1 - K_o)(12 - W)], \qquad (11.2)$$

где ρ_{012} — средняя плотность образца древесины при влажности 12 %; ρ_w – средняя плотность древесины при фактической влажности W; K_o — коэффициент объемной усушки, который показывает, на сколько процентов изменяется объем образца при изменении его влажности на 1 %. У древесины большинства пород $K_o = 0{,}5$.

Пористость древесины колеблется в широких пределах: для хвойных пород от 46 до 85 %, для лиственных — от 32 до 80 %. Характер и размер отдельных пор влияют на водопоглощение, возможность пропитки, тепло-, звуко-, электропроводность и другие свойства.

Важным свойством древесины является ее отношение к воде, которое характеризуется влажностью, водопоглощением, гигроскопичностью и др. ***Вода*** в древесине может быть в форме капиллярной, гигроскопической и химически связанной. *Капиллярная вода* заполняет полости клеток и межклеточные

пространства; *гигроскопическая* — находится в стенках клеток; *химически связанная* — входит в состав образующих древесину веществ. Основная масса воды находится в древесине в виде капиллярной и гигроскопической. В сухой древесине находится только гигроскопическая вода, в свежесрубленной и мокрой — капиллярная и гигроскопическая.

Влажность древесины, в которой содержится наибольшее количество гигроскопической влаги, при отсутствии капиллярной, называется ***точкой насыщения волокон***. Для разных пород она составляет 23...30 %.

По степени влажности выделяют древесину:

- мокрую (влажность более 100 %);
- свежесрубленную (35...100 %);
- воздушно-сухую (15...20 %);
- комнатную (8...12 %).

При сушке древесины сначала удаляется капиллярная (свободная) вода до точки насыщения волокон, что снижает массу образца, но не сказывается на его размерах. Испарение гигроскопической (связанной) воды затруднено; оно сопровождается уменьшением размеров и объема древесины (линейная и объемная усушка), что оказывает существенное влияние на ее свойства. Особенно трудно удаляются последние 4...6 % гигроскопической влаги, так как она ориентированно закреплена (адсорбирована) в монослое молекулами целлюлозы (присутствуют водородные связи между гидроксилами целлюлозы и водой).

С приближением температуры сушки к 105 °С масса древесины сохраняет постоянное значение, что и принимается за ***абсолютно сухое*** ее ***состояние***. Абсолютно сухая древесина состоит из двух компонентов — древесного вещества и воздуха. Фактически около 1 % гигроскопической влаги в абсолютно сухой древесине сохраняется, но благодаря относительно прочным водородным связям она не снижает ее качественных показателей. Дальнейшее повышение температуры вызывает более или менее глубокое разложение целлюлозы — ее деструкцию, особенно в присутствии воздуха и влаги.

Таким образом, при нагревании свыше 105...110 °С непрерывно протекают процессы деструкции, а древесина срав-

нительно быстро теряет свои высокие физико-механические свойства, которые она имела в абсолютно сухом состоянии.

Различают линейную и объемную усушку древесины, вычисляемую по формуле

$$Y_o = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_1} \cdot 100, \qquad (11.3)$$

где Y_o — усушка, %; α_2 — линейные размеры или объем влажного образца древесины, соответственно см или см^3; α_1 — линейные размеры или объем образца, высушенного до абсолютно сухого состояния, соответственно см или см^3.

Вследствие неоднородного строения древесины *линейная усушка* в различных направлениях неодинакова. Так, вдоль волокон она незначительна и для древесных пород, применяемых в строительстве, обычно не превышает 0,1 %. Линейная усушка в тангенциальном направлении максимальна и для различных древесных пород составляет 7...12 %. Усушка в радиальном направлении равна 3...6 %.

Показателем усыхания древесины при удалении из нее гигроскопической влаги является также коэффициент объемной усушки K_o, вычисляемый по формуле

$$K_o = \frac{Y_o}{W}. \qquad (11.4)$$

Древесина как капиллярно-пористый материал обладает ***гигроскопичностью***, т.е. способностью отдавать влагу или поглощать водяные пары из воздуха в зависимости от влажности и температуры окружающего воздуха и влажности самой древесины. При длительном нахождении древесины на воздухе с постоянными температурой и влажностью устанавливается состояние гигрометрического равновесия, характеризующееся тем, что упругость водяных паров в воздухе и в капиллярах древесины одинакова. Зависимость между равновесной влажностью древесины и соответствующими параметрами окружающего воздуха приведена на рис. 11.5.

Способность древесины поглощать воду называется ***водопоглощением***, которое зависит от плотности древесины: наиболее легкая поглощает большее количество воды.

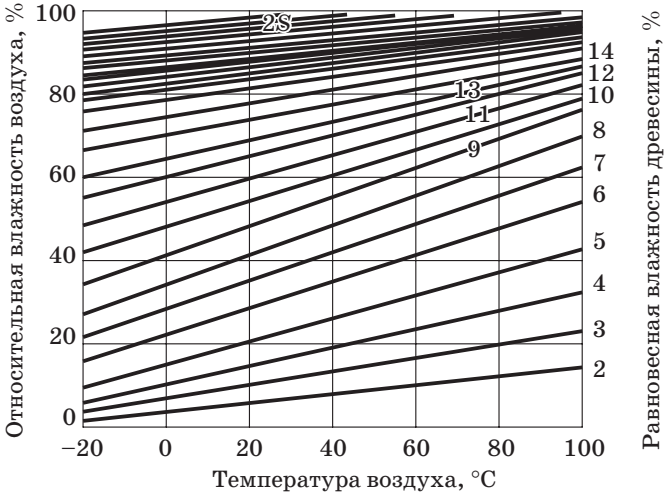


Рис. 11.5. Диаграмма зависимости влажности древесины от температуры и относительной влажности воздуха

При увлажнении до точки насыщения волокон объем и линейные размеры древесины увеличиваются, т.е. наблюдается ***разбухание***. Объемная и линейная деформации разбухания древесины (рис. 11.6) находятся в прямой зависимости от количества поглощенной ею влаги до влажности, соответствующей точке насыщения волокон. При дальнейшем увлажнении разбухание прекращается. При высыхании влажной древесины от точки насыщения волокон деформация усушки тем больше, чем больше количество испарившейся влаги.

Различные усушка и разбухание древесины в радиальном и тангенци-

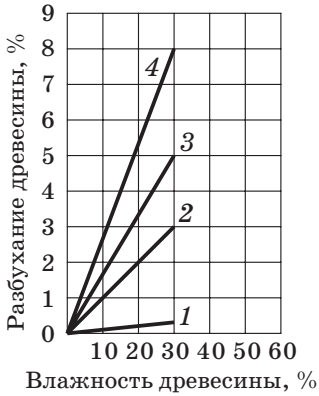


Рис. 11.6. Линейные и объемные деформации разбухания древесины:
1 — вдоль волокон; *2* — в радиальном направлении; *3* — в тангенциальном направлении; *4* — объемные

альном направлениях и вдоль волокон при неравномерном высыхании или разбухании приводят к возникновению внутренних напряжений, что может вызвать коробление и появление трещин.

Для повышения долговечности деревянных конструкций, обеспечения стабильности их форм и размеров и исключения возможности их растрескивания следует использовать древесину с влажностью, равновесной условиям ее службы в зданиях, сооружениях, а в случаях непостоянства температурно-влажностных условий воздушной среды принимать меры по защите древесины от увлажнения.

Древесина как высокопористый материал характеризуется относительно низкой ***теплопроводностью***. Теплопроводность абсолютно сухой древесины возрастает с повышением объемной массы вследствие уменьшения пористости. Теплопроводность вдоль волокон примерно в два раза больше, чем поперек волокон. Так, у сосны вдоль волокон $\lambda = 0{,}35$ Вт/(м · °С) [0,3 ккал/(м · ч·°С)], поперек волокон $\lambda = 0{,}17$ Вт/(м · °С) [0,15 ккал/(м · ч · °С)]. Теплопроводность древесины повышается с увеличением влажности. С увеличением плотности и влажности уменьшается количество воздуха, находящегося в пустотах, вследствие чего теплопроводность древесины увеличивается.

Теплоемкость древесины возрастает с увеличением влажности W и температуры t и ориентировочно может быть вычислена по формуле

$$C = \frac{26{,}6 + 0{,}166t + W}{100 + W}. \qquad (11.5)$$

Теплоемкость абсолютно сухой древесины всех пород примерно равна 1,38 кДж/(кг · °С) [0,33 ккал/(кг · °С)].

11.6.2. Химическая стойкость древесины

Древесина характеризуется высокой стойкостью к действию многих агрессивных сред, например растворов солей, щелочей, большинства органических кислот и слабых растворов минеральных кислот. Коррозионная стойкость древе-

сины тем выше, чем больше ее плотность, т.е. чем плотнее ее строение.

Концентрированные растворы минеральных кислот, а также азотная кислота любых концентраций разрушают древесину. Древесина хвойных пород характеризуется большей коррозионной стойкостью, чем древесина лиственных пород.

11.6.3. Механические свойства древесины

Механические свойства древесины существенно зависят от влажности, причем влияние оказывает только гигроскопическая влага. Из рис. 11.7 видно, что наиболее резкое снижение прочности наблюдается при увеличении влажности от 0 до 20...25 %; в дальнейшем снижение прочности замедляется, а после достижения предела гигроскопичности (точки насыщения волокон) влажность практически не влияет на прочность древесины.

Влияние гигроскопической влаги на механические свойства древесины, в частности на прочность на сжатие, объясняется следующим. Толщина гидратных оболочек вокруг кристалликов целлюлозы зависит от содержания гигроскопической влаги. При удалении последней из межмицеллярного пространства в процессе высушивания древесины не только происходит сближение мицелл, но и повышается прочность и клеящая способность гидрофильного коллоидного вещества, окружающего кристаллики целлюлозы, что приводит к повышению прочности древесины.

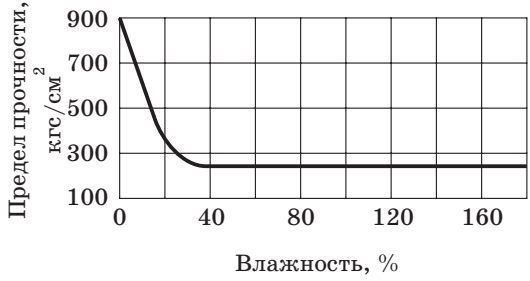


Рис. 11.7. Влияние влажности древесины на прочность на сжатие вдоль волокон

Полученные при испытании показатели механических свойств древесины должны быть приведены к стандартной влажности 12 % по следующей формуле:

$$B_{12} = B_W[1 + \alpha(W - 12)], \qquad (11.6)$$

где B_{12} — показатель данного свойства при влажности 12 %; B_W — показатель этого свойства при влажности в момент испытания W; α — поправочный коэффициент на влажность, показывающий, на сколько изменяется показатель данного свойства при изменении влажности на 1 %.

Выдерживание древесины в атмосфере влажностью 12±1 % требует продолжительного времени (1–1,5 мес.), поэтому при определении ориентировочных показателей механических свойств древесины (например, в производственных условиях) применяют *ускоренные методы испытаний*.

Один из этих методов основан на том, что увеличение влажности древесины выше предела гигроскопичности, т.е. более 30 %, не сопровождается уменьшением прочности. Поэтому можно не определять фактическую влажность образцов, приняв ее равной 30 %. Если образцы имеют влажность меньше предела гигроскопичности, то их вымачивают в воде. Показатели механических свойств древесины при влажности, равной пределу гигроскопичности и выше (30 % и более), пересчитывают к стандартной влажности 12 % по формуле

$$B_{12} = B_{30} K_{30}, \qquad (11.7)$$

где B_{30} — показатель данного свойства при влажности 30 % и более; K_{30} — пересчетный коэффициент на влажность.

Другой ускоренный метод определения механических свойств древесины заключается в том, что испытания проводятся при любой влажности менее предела гигроскопичности (менее 30 %). При испытании по этому методу приходится определять фактическую влажность образцов в момент испытания. Полученные показатели приводятся к стандартной влажности 12 % по формуле

$$B_{12} = B_W K_W, \qquad (11.8)$$

где K_W — пересчетный коэффициент на влажность.

Численные значения коэффициентов α, K_{30}, K_W приведены в соответствующих ГОСТах на методы испытаний древесины, а также в методических пособиях к лабораторным работам по испытанию древесины.

Прочность древесины на сжатие. Древесина вследствие волокнистого строения является анизотропным материалом с высокой прочностью на сжатие вдоль волокон и относительно низкой — поперек волокон.

Предел прочности древесины на сжатие вдоль волокон определяют при испытании стандартных образцов в форме призмы размером 20×20×30 мм. Образцы, установленные между плитами пресса, доводят до разрушения непрерывно и равномерно возрастающей нагрузкой, после чего предел прочности вычисляют по формуле

$$R_{сж} = \frac{P_{max}}{ab}, \qquad (11.9)$$

где $R_{сж}$ — предел прочности на сжатие вдоль волокон при влажности W, МПа; P_{max} — максимальная (разрушающая) нагрузка, Н; a, b — размеры поперечного сечения образца, м.

Прочность древесины, как и других пористых материалов, увеличивается с повышением плотности (табл. 11.2).

Таблица 11.2

Физико-механические свойства древесины при стандартной 12%-ной влажности

Порода	Средняя плотность, кг/м^3	Предел прочности, МПа		
		на сжатие вдоль волокон	на растяжение вдоль волокон	на изгиб
Сосна	500	48	103	86
Ель	445	44	103	79
Лиственница	660	64	125	111
Береза	630	55	168	109
Дуб	690	57	123	107
Бук	670	55	123	108
Липа	495	45	121	88

Древесина характеризуется высокой ***прочностью на растяжение*** вдоль волокон, в 2–3 раза превышающей прочность

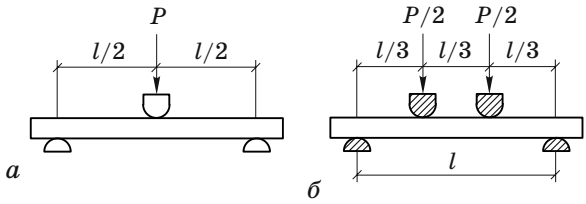


Рис. 11.8. Схема испытания древесины на статический изгиб: *а* — при действии сосредоточенной силы в середине пролета; *б* — при действии двух сосредоточенных симметрично расположенных сил

на сжатие вдоль волокон, и очень низкой прочностью на растяжение поперек волокон (у хвойных пород она составляет всего лишь 2...5 % прочности на растяжение вдоль волокон) вследствие слабого сцепления древесных волокон в поперечном направлении. Прочность древесины на растяжение мало зависит от влажности, но весьма существенно изменяется у одной и той же породы в зависимости от строения, особенно от наличия некоторых пороков (сучки, косослой и др.).

Прочность древесины на статический изгиб определяют на образцах-балочках поперечным сечением 20×20 мм и длиной 300 мм. Возможные схемы испытаний приведены на рис. 11.8.

Предел прочности древесины при действии сосредоточенной силы в середине пролета вычисляют по формуле

$$R_{\text{изг}} = \frac{3P_{\max}l}{2bh^2}, \qquad (11.10)$$

а при действии двух сосредоточенных симметрично расположенных сил — по формуле

$$R_{\text{изг}} = \frac{P_{\max}l}{bh^2}, \qquad (11.11)$$

где $R_{\text{изг}}$ — предел прочности на изгиб при влажности W, МПа; l — расстояние между центрами опор, м; b и h — ширина и высота сечения образца, м.

Прочность древесины на статический изгиб определяется теми же факторами, что и прочность на сжатие и растяжение вдоль волокон; она больше прочности на сжатие вдоль волокон в среднем в 1,5–2 раза.

По прочности на сжатие древесина соответствует наиболее высоким классам бетона, а по прочности на растяжение и изгиб — намного превосходит его. Однако на практике использовать высокую прочность древесины на растяжение очень трудно из-за сложности закрепления рабочих концов изделий, в которых возникают скалывающие напряжения и происходит смятие древесины. Сопротивляемость древесины скалыванию и смятию весьма невелика. Поэтому древесину в основном используют в изгибаемых и сжимаемых конструкциях (балках, стойках), реже — в растягиваемых элементах (затяжках стропильных ферм).

Твердость имеет большое значение при обработке древесины режущим инструментом. Наибольшей твердостью обладает торцовая поверхность. По степени твердости все древесные породы разделяют на три группы:

- мягкие (торцовая твердость — менее 38,5 МПа при 12%-ной влажности) — сосна, ель, кедр, пихта, липа, тополь, ольха;
- твердые (торцовая твердость 38,5...82,5 МПа) — лиственница, береза, бук, вяз, дуб, ясень, клен;
- очень твердые (более 82,5 МПа) — акация белая, береза железная, граб, тисс, кизил, самшит.

Способность удерживать металлические крепления — своеобразное свойство древесины, обусловленное упругостью ее волокон. Гвоздь, вбиваемый в древесину, раздвигает волокна, которые оказывают на его боковую поверхность значительное давление. Возникающие при этом силы трения прочно удерживают гвоздь. Способность удерживать металлические крепления оценивают по сопротивлению выдергиванию гвоздей или шурупов. Сопротивление выдергиванию соответствует усилию, необходимому для выдергивания из древесины гвоздя или шурупа стандартных размеров.

Наибольшее сопротивление выдергиванию древесина оказывает в радиальном и тангенциальном направлениях; усилие выдергивания гвоздя, вбитого в торец, т.е. вдоль волокон древесины, почти на 50 % меньше. Вот почему для получения прочного соединения деревянных деталей не следует вбивать

гвозди или ввинчивать шурупы вдоль волокон древесины. Сопротивление древесины выдергиванию шурупов примерно в 4–5 раз больше, чем гвоздей.

11.7. Применение деревянных конструкций в мостостроении

Для деревянных конструкций мостов следует применять древесину сосны, ели, лиственницы, пихты, удовлетворяющую требованиям ГОСТ 9463–88 и ГОСТ 8486–86Е.

Растянутые и изгибаемые элементы пролетных строений и мостовые брусья должны выполняться из высококачественной древесины.

Для изготовления мелких деталей соединений (подушек, шпонок и т.п.) следует применять отборную древесину твердых лиственных пород (дуб, ясень, бук и граб), удовлетворяющих требованиям ГОСТ 9462–88 (для круглого леса лиственных пород) и ГОСТ 2695–83 (для пиломатериалов лиственных пород).

Влажность применяемой древесины должна быть не более 25 % для бревен, 20 % для пиломатериалов, 12 % для пиломатериалов для клееных конструкций, а также мелких деталей и соединений.

В деревянных мостах следует применять элементы заводского изготовления.

Главные балки пролетных строений длиной 15 м и более следует, как правило, устанавливать на резиновые опорные части.

В поперечном сечении деревянные части и металлические изделия мостов должны иметь размеры, не менее приведенных в табл. 11.3.

Проезжую часть автодорожных и городских мостов следует устраивать с дощато-гвоздевой плитой или с двойным дощатым настилом. Верхний настил проезжей части автодорожных и городских мостов рекомендуется делать продольным. Толщина досок настила должна быть не менее 5 см.

Таблица 11.3

Наименьшие размеры деревянных элементов и металлических изделий для мостов

Деревянные части и металлические изделия	Нормируемый размер поперечного сечения	Наименьшее значение нормируемого размера для автодорожных и городских мостов
Брусья и доски:	Большая сторона, см	
основных элементов		16
вязей, стыковых накладок		
перил и других дополнительных элементов		8
Доски	Толщина, см	4
Бревна в тонком конце:	Диаметр, см	
для основных элементов		18
для свай		22
для накатника		14
Пластины	Радиус круга, см	9
Болты:	Диаметр, мм	
рабочие и стяжные		19
конструктивные		16
Стальные тяжи	Диаметр, мм	22
Гвозди и дюбели	Диаметр, мм	4
Стальные накладки	Толщина, мм	8
Зубчатые шипы	Длина, см	3,2

При конструировании проезжей части клееных пролетных строений автодорожных и городских мостов необходимо предусматривать продольные и поперечные уклоны, обеспечивающие быстрый сток воды с проезжей части.

Основной причиной ограниченного строительства деревянных мостов является их малая долговечность и необходимость частого ремонта. Однако их срок службы при применении клееных и клеефанерных конструкций может быть доведен до 40 лет и более.

Клееные конструкции — конструкции, элементы которых выполнены из досок, брусков, фанеры путем монолитного соединения их клеем. В качестве основных материалов для из-

готовления клееных конструкций используются пиломатериалы хвойных пород (сосна, ель), синтетические водостойкие клеи, защитные составы.

Для изготовления несущих клееных деревянных конструкций пригодны хвойные материалы 1-го и 3-го сорта с влажностью 10±2 %, длиной от 2 до 6,5 м.

Проезжая часть клееных пролетных строений должна защищать нижележащие конструкции от попадания осадков и прямого солнечного освещения. Брусья и бревна прогонов должны быть связаны между собой и закреплены на опорах от продольных и поперечных смещений.

Основным достоинством клееных деревянных конструкций является получение эффективных сечений и требуемой длины. Склейка позволяет широко использовать маломерный пиломатериал.

Основные типы клеевых соединений заготовок для изготовления клееных деревянных конструкций (по пласти, кромке, длине) показаны на рис. 11.9.

Опыт эксплуатации клееных балок показывает, что их работоспособность определяется выбором клея и качеством соблюдения технологии изготовления. Прочность и жесткость клееных конструкций во многом зависит от склейки, высокое качество которой достигается при налаженном заводском из-

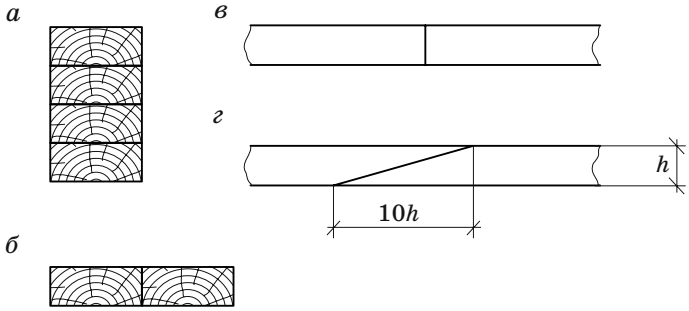


Рис. 11.9. Клеевые соединения заготовок для изготовления деревянных элементов:
а — по пласти; *б* — по кромке; *в* — по длине в стык; *г* — по длине «на ус»

готовлении конструкций из лесоматериала влажностью не более 15 %.

Основные характеристики водостойких синтетических клеев, используемых в производстве клееных деревянных конструкций приведены в табл. 11.4. В состав любого клея входят следующие компоненты: смола, отвердитель, наполнитель и технологические добавки.

Все клеи классифицируются по типу смолы. Для склеивания элементов конструкций следует применять клеи, обладающие необходимой прочностью, водостойкостью, биостойкостью и долговечностью: фенольные, резорциновые и фенольно-резорциновые, которые в зависимости от условий эксплуатации должны соответствовать требованиям СНиП II-25-80.

Для склеивания древесины с металлом следует применять *эпоксидные клеи*.

В основном используются *фенолоформальдегидные смолы* и их сочетания. В настоящее время практически повсеместно используют клеи марок ФРФ-50, ФР-100 и их модификации, которые по своим параметрам не уступают зарубежным аналогам.

Важнейшими техническими характеристиками клеев являются: вязкость, рабочая жизнестойкость и время отверждения (полимеризации).

Сечение балок, как правило, выполняют прямоугольным. Если необходимо ограничить сечение балок, то увеличить их несущую способность можно за счет армирования стержнями. Для этого при изготовлении в пазы досок укладывают арматуру с заливкой эпоксидным компаундом, который обеспечивает надежную совместную работу арматуры и клееной древесины.

За рубежом в последние годы уделяют большое внимание применению клееной древесины в мостостроении. Опыт строительства и эксплуатации деревянных мостов из клееной древесины в Канаде показал, что конструкции отличаются низкой стоимостью, быстротой монтажа, не требуют расходов по содержанию и имеют срок службы 40–50 лет. Только в провинции Британская Колумбия в Канаде эксплуатируется около 300 таких мостов с пролетами 9,2...45,8 м.

Таблица 11.4

Основные марки клеев для производства клееных деревянных конструкций

Показатели	Фенольные (КБ-3)	Резорциновые	Фенольно-резорциновые	Алкил-резорциновые
Марка смолы (ГОСТ или ТУ)	СФЖ (3-2097-75) 100 вес. частей	ФР-12 (6-05-1748-75) 100 вес. частей	ФРФ-50 (6-05-1880-79) 100 вес. частей	ДФК-14Р (22390-41-80) 100 вес. частей
Отвердитель	Керосиновый контакт Петрова (18–25 вес. частей)	Параформальдегид в смеси с древесной мукой (10–13,5 вес. частей)	—	—
Жизнеспособность клея при $t = 18...22$ °С, ч	1,5...2	2...4	3...5	2
Вязкость клея, с	10...60	15...30	8...30	10...50
Срок хранения смолы, мес.	2	9	6	6
Горючие растворители, %	7...12	10	—	4...10
Содержание вредных веществ, %:				
фенола	5	—	2	—
формальдегида	4	—	—	—

11.8. Виды изделий из древесины (сортамент)

Различают три вида лесных материалов:

- круглые (необработанные);
- пиломатериалы (обработанный лес);
- строительные детали и полуфабрикаты.

Лесные древесные материалы одного наименования, одного и того же способа обработки, одинаковой формы и изготовленные из определенной древесной породы называют ***сортаментом***.

Круглые лесные материалы. Это очищенные от сучьев и коры отрезки древесных стволов длиной более 4 м.

В зависимости от диаметра ствола в верхнем торце круглый лес подразделяют:

- на бревна (d = 14 см и более, длина 2...16 м);
- подтоварник (d = 8...14 см, длина 3...9 м);
- жерди (d = 3...7 см, длина 3...9 м).

В зависимости от назначения различают строительные и пиловочные бревна.

Строительные бревна производят в основном из хвойных пород (сосна, ель, лиственница) и используют для изготовления несущих строительных конструкций промышленных, общественных и жилых зданий и гидротехнических сооружений, а также свай и пролетных строений деревянных мостов.

Пиловочные бревна производят из стволов хвойных и лиственных пород. Они предназначены для получения различных пиломатериалов.

Короткие, толстые обрезки древесного ствола диаметром более 200 мм называют ***кряжами***. Их используют для изготовления мебели и различных видов фанеры.

Пиломатериалы. Получают путем продольной распиловки пиловочных бревен. Пиломатериалы подразделяются на брусья, доски, бруски, шпалы и др.

Строительные брусья (рис. 11.10) представляют собой бревна, обработанные с двух или четырех сторон таким обра-

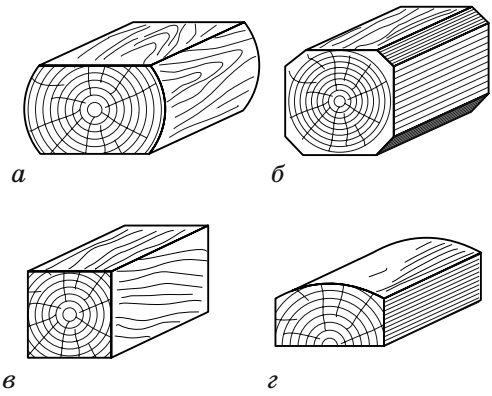


Рис. 11.10. Брусья:
а — лежень; *б* — тупокантный брус; *в* — острокантный брус; *г* — голландский брус

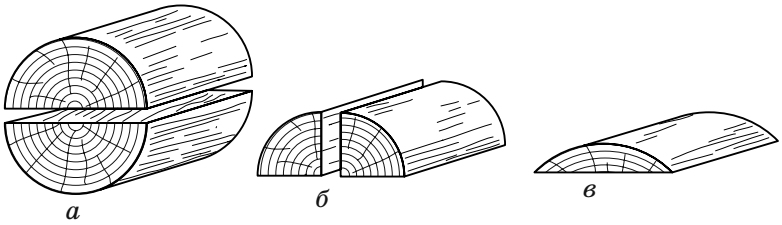


Рис. 11.11. Распиленные элементы круглого дерева:
а — пластины; *б* — четвертины; *в* — горбыль

зом, что они имеют параллельные плоскости. В зависимости от количества обработанных сторон различают брусья *двухкантные* и *четырехкантные*. Четырехкантные брусья могут быть тупокантные и острокантные.

Кроме того, круглые строительные бревна могут распиливаться по диаметру или по двум взаимно перпендикулярным диаметрам. В первом случае получаются ***пластины***, во втором случае — ***четвертины*** (рис. 11.11).

Доски и ***бруски*** представляют собой пиленый материал правильного прямоугольного или приближающегося к нему сечения, получаемый из хвойных и лиственных пород. В досках ширина материала превышает его толщину в три раза и более; в брусках толщина материала составляет более 1/3 ширины. В зависимости от чистоты обработки доски делятся на *чистообрезные*, полученные от распиловки бруса, и *полуобрезные*, полученные при распиловке круглого пиловочного леса (рис. 11.12).

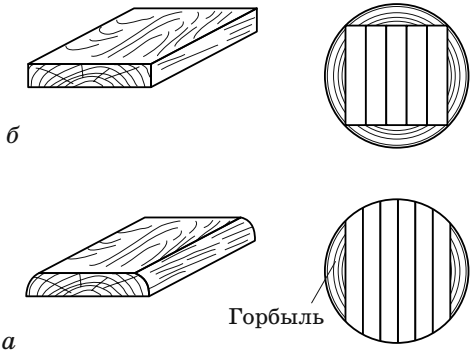


Рис. 11.12. Доски:
а — чистообрезные; *б* — полуобрезные

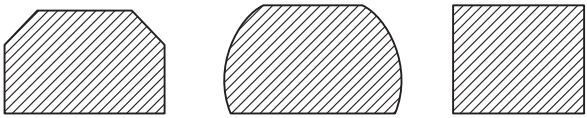


Рис. 11.13. Шпалы

Доски, обрезанные только с одной стороны (отпиленные снаружи круглого бревна), называются ***горбылем***.

Шпалы изготовляют из круглого леса обработкой на два или четыре канта. Шпалы имеют длину 2,5...2,7 м для широкой колеи и 1,35...1,80 м для узкой колеи. Форма поперечного сечения шпал показана на рис. 11.13.

Строительные детали и полуфабрикаты. К ***полуфабрикатам*** и ***заготовкам*** относятся доски или брусья, прирезанные применительно к заданным размерам, с соответствующими припусками на механическую обработку и усушку: *шпунтованные доски* для полов, *плинтусы, галтели* для заделки пространства между полом и стенами, *наличники* для обшивки оконных и дверных коробок.

Строительные детали — это элементы сборных домов, различные столярные изделия, изготовленные на специализированных заводах. Наиболее прогрессивными являются клееные деревянные конструкции, которые применяют в покрытиях, перекрытиях, мостах в качестве балок, арок, металлодеревянных ферм и других конструкций.

Клееные конструкции изготовляют путем склеивания досок (брусков), фанеры с применением высокопрочных и водостойких полимерных клеев, обеспечивающих получение швов большей прочности, чем прочность самой древесины.

Лущеные лесные сортаменты (изделия) изготовляют путем снятия с предварительно распаренного кругляка спиральной стружки (*шпона*) в тангенциальном направлении на лущильном станке. Из шпона изготовляют ***фанеру***, которую склеивают из нечетного числа шпонов так, чтобы волокна древесины шпонов, прилегающих друг к другу, были взаимно перпендикулярны. В зависимости от вида применяемого клея получают фанеру: водостойкую (ФСФ), склеенную фенолоформальдегидными клеями; средней водостойкости (ФК), скле-

енную карбамидными клеями; ограниченной водостойкости (ФБА), склеенную альбумино-казеиновым или белковым клеем. Фанера обладает некоторыми недостатками древесины: неодинаковое сопротивление усилиям в разных направлениях, коробление и др.

Древесный шпон, пропитанный бакелитовыми или формальдегидными смолами с последующей горячей прессовкой, называется ***балинитом*** или ***лигнофолем***.

Дельта-древесину изготавливают из пропитанного фенольными клеями древесного шпона, который укладывают по 10 шпонов в продольном направлении и по 1 шпону в поперечном направлении.

11.9. Пороки древесины

Пороками древесины называют отклонения от нормального строения и повреждения древесины, снижающие ее качество и ограничивающие применение. Их подразделяют на первичные и вторичные.

Первичные пороки. Большинство первичных пороков образуется в растущем дереве вследствие ненормальных условий его роста, климатических воздействий, порчи насекомыми и образования гнили. К ним относят:

- сучковатость;
- морозные трещины;
- сбежистость;
- нарост;
- косослой;
- свилеватость.

Последние четыре относятся к порокам формы ствола дерева.

Сучковатость — наиболее распространенный порок древесины. Сучки подразделяются на здоровые (сросшиеся) и пораженные гнилью (часто выпадающие и образующие «дырки» в досках) (рис. 11.14).

Древесину с сучками, пораженными гнилью, не следует применять для ответственных деревянных конструкций, так

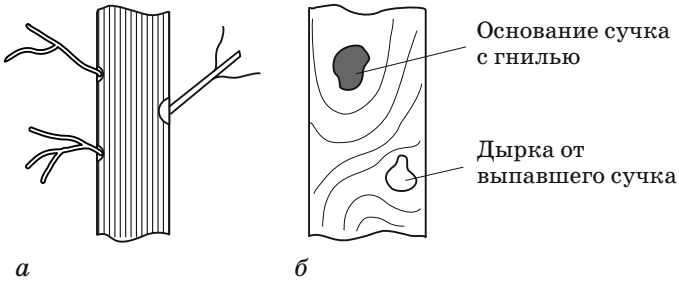


Рис. 11.14. Сучковатость:
а — ствол дерева с ветвями; *б* — доска с основаниями сучков

как такие сучки не только понижают механические свойства древесины, но и могут явиться источником распространения *грибковой инфекции*.

Для изготовления деревянных конструкций применяют только древесину со здоровыми сросшимися сучками, число и размеры которых ограничиваются в зависимости от сортности. Для изготовления ответственных мелких деталей (шпонок, нагелей, вкладышей) используют только плотную древесину без сучков и других пороков.

Морозные трещины образуются в растущем дереве под влиянием низких температур. Это длинные и глубокие радиально направленные трещины, проходящие из заболони к ядру и раскрывающиеся на боковую поверхность ствола.

Сбежистость — порок, характеризующийся уменьшением диаметра ствола от комля к вершине более чем на 2 см на 1 м длины ствола. Она понижает выход пиломатериалов, а в некоторых случаях и сортность древесины.

Нарост — резкое местное утолщение ствола различной формы и размера.

Косослой — порок древесины, характеризующийся винтообразным, косым расположением волокон в стволе, при этом прочность древесины при сжатии вдоль волокон заметно снижается.

Свилеватость — порок, выражающийся в волнистом и путаном расположении древесных волокон. Свилеватость понижает прочность древесины при изгибе.

Вторичные пороки. Это пороки древесины (дефекты) механического происхождения, возникающие в процессе заготовки, транспортирования и механической обработки. К ним относят плесени и гнили, червоточины, трещины, образующиеся при сушке изделий из древесины, и др.

Плесени и ***гнили*** — это пороки древесины, вызванные жизнедеятельностью различных грибов. Некоторые из видов грибов могут поражать древесину растущего дерева (на корню) и тогда, в соответствии с принятой классификацией, вызываемые ими пороки относят к первичным.

Значительную опасность для долговечности деревянных конструкций представляют грибные поражения, разрушающие древесину в условиях ее службы в зданиях и сооружениях. Они весьма многочисленны и могут возникать в древесине растущих и срубленных деревьев.

Грибы относятся к простейшим растительным организмам и принадлежат к группе споровых растений. Споры при помощи ветра или воды попадают на здоровую древесину и начинают там развиваться при благоприятных условиях (влажность 25...35 %, температура 20…45 °С). При влажности ниже 20 % грибы развиваться не могут. Невозможно развитие грибов и при полном насыщении водой, так как в ней недостает воздуха. При температуре ниже 2 °С и выше 45 °С развитие грибов прекращается, а при 60 °С большинство грибов погибает. Питательным веществом для грибов является целлюлоза клеток.

Под воздействием грибов в древесине происходят изменения двоякого рода. В одном случае грибы изменяют лишь цвет древесины. Такие грибы называют *деревоокрашивающими*. В других случаях, кроме изменения цвета древесины в начальной стадии, грибы приводят к ее разрушению (гниению) и называются *дереворазрушающими*.

Одни грибы развиваются только на растущих деревьях, другие — только на срубленных, третьи — как на растущих, так и на срубленных деревьях (например, гниль дуба белая или бурая, гниль лиственных пород белая и др.).

Грибы, вызывающие загнивание древесины непосредственно в зданиях, называют *домовыми*. Наиболее опасными, бы-

стро разрушающими древесину, являются грибы: домовый белый, пленчатый, пластинчатый.

Плесень — поверхностное окрашивание древесины в различные цвета (сине-зеленый, голубой, черный, розовый и др.). Она не влияет на механические свойства древесины, но ухудшает ее внешний вид.

Повреждаться насекомыми могут как деревья на корню, так и спиленные. Насекомые поражают преимущественно неокоренные свежесрубленные лесоматериалы. В зависимости от глубины проникания и размеров ходов ***червоточина*** бывает поверхностная, неглубокая, глубокая, сквозная, некрупная и крупная. Поверхностная червоточина не влияет на механические свойства древесины. Остальные виды червоточины снижают ее механические свойства и способствуют поражению грибами.

Инородные включения **и** ***дефекты*** подразделяются на инородные включения, механические повреждения, обугленность и др.

Механические повреждения — повреждения древесины механизмами и инструментами при заготовке, подсечке, транспортировке, сортировке и обработке. К ним относятся: обдир коры, заруб и запил, карра (повреждение ствола при подсечке), отщип, скол и вырыв, багорные наколы. Механические повреждения снижают качество древесины.

Рассмотренные пороки и дефекты в зависимости от их вида и размера снижают качество древесины.

Пригодность древесины для строительных материалов зависит от наличия, расположения, размеров пороков, дефектов, а также от назначения лесных сортаментов. В стандартах на вид сортаментов указаны допустимые пороки, на основании которых оценивают и сортируют материалы.

Согласно ГОСТ 2140–81 пороки и дефекты древесины разделены на следующие группы: сучки, трещины, пороки формы ствола, пороки строения древесины, химические окраски, грибные поражения, повреждения насекомыми, инородные включения и дефекты, деформации. Каждая группа пороков, в свою очередь, подразделяется на виды и разновидности.

11.10. Заготовка и сушка древесины

Древесину можно заготавливать круглый год, но лучшим временем для этого считается осенне-зимний период. К его началу количество питательных соков в дереве уменьшается, а наружная поверхность древесины закрыта последним годичным слоем, состоящим из плотной летней древесины.

Заготовка древесины состоит из *валки деревьев*, *очистки их от сучков* и *раскряжевки*. Лесозаготовку ведут механизированно, валку и раскряжевку выполняют цепными бензомоторными или электрическими пилами, *трелевку* (перемещение сваленных деревьев) — тракторами, лебедками.

Основной (нижний) склад лесозаготовительного предприятия располагается у железной дороги или сплавной реки и представляет собой механизированный цех, оснащенный *окорочными* станками, балансирными и цепными пилами, шпалорезными установками и другими механизмами для переработки древесины.

Свежесрубленная древесина легко загнивает и имеет меньшую прочность, чем сухая. Влажная древесина хуже обрабатывается и имеет большую плотность, что увеличивает транспортные расходы.

Одним из эффективных профилактических мероприятий, предупреждающих загнивание деревянных конструкций, является сушка древесины до влажности, при которой невозможна жизнедеятельность низших микроорганизмов (грибов), с последующей надежной защитой деревянных элементов от увлажнения в процессе эксплуатации зданий. Сушка древесины заключается в удалении из нее всей капиллярной и части гигроскопической влаги путем испарения или выпаривания.

Различают сушку: воздушную, камерную, контактную, в электрическом поле высокой частоты, в нагретых жидких средах.

Воздушная сушка — сушка древесины, уложенной в штабеля на открытом воздухе, до воздушно-сухого состояния, т.е. до влажности 12...20 %. Преимущества воздушной суш-

ки — простота процесса, низкие начальные затраты на устройство складов и отсутствие затрат на подогрев теплоносителя. Недостатки — длительность процесса и трудность его регулирования, а также возможность поражения древесины грибами и червоточцами. Продолжительность воздушной сушки древесины до воздушно-сухого состояния зависит от климатических условий (температуры и влажности воздуха), плотности древесины, размеров лесоматериала и составляет 1–2 мес. при влажности воздуха 60 % (при большей влажности — до одного года).

Камерная сушка — сушка в специальных сушилках (камерах), в которых в качестве теплоносителя используют подогретый воздух или дымовые газы. Преимущества камерной сушки — полная регулируемость процесса и возможность высушивания лесоматериалов до влажности 6...10 %. При этом процесс сушки сокращается в 10 раз по сравнению с естественной. Продолжительность камерной сушки (от 60%-ной влажности до 12%-ной) составляет для сосновых и еловых досок, в зависимости от толщины, от 3 до 6 сут., для дубовых — 14–28 сут.

Так как древесина при искусственной сушке прогревается до 70...80 °С, полностью исключается возможность заражения грибами. Однако при искусственной сушке необходимо иметь специальное оборудование и помещение, увеличивается расход топлива и электроэнергии.

Контактная сушка производится для тонких сортаментов древесины (фанеры), при этом их помещают между периодически смыкаемыми горячими плитами пресса.

Сушка током высокой частоты осуществляется в результате нагрева древесины, помещенной между электродами. Переменный ток, проходя через толщу древесины, переходит в тепло, которое равномерно распределяется по всей толще, высушивает ее без коробления и трещин. Вследствие большого расхода электроэнергии этот способ применяется ограниченно.

Сушка в нагретых жидких средах осуществляется погружением древесины в нагретый до температуры 120...140 °С петролатум (смесь парафинов и церезинов с высоковязким

очищенным нефтяным маслом). Древесина быстро прогревается, а находящаяся в ней влага переходит в пар с давлением выше атмосферного и удаляется. Этот способ ускоряет сушку и позволяет совместить ее с пропиткой древесины антисептиками.

11.11. Защита древесины от гниения, разрушения насекомыми и возгорания

Многие деревянные конструкции в период эксплуатации подвергаются отрицательному воздействию факторов внешней среды, что резко снижает их качество.

11.11.1. Защита древесины от гниения (консервация древесины)

Если в условиях службы в конструкции древесина подвергается систематическому увлажнению (например, в сваях, шпалах, деревянных опорах линий электропередачи и т.п.) или конструкции изготовляют из сырой и плохо просушенной древесины, то для увеличения срока службы деревянных конструкций и предохранения их от загнивания необходимо *консервировать древесину*, т.е. обрабатывать антисептиками.

Антисептиками (от анти — против и греч. septicós — гнилостный) называют вещества, применяемые в строительстве для защиты деревянных конструкций и частей зданий от гниения. Они или непосредственно убивают грибы, или создают среду, в которой их жизнедеятельность становится невозможной. Антисептики должны удовлетворять следующим требованиям:

- обладать высокой токсичностью по отношению к низшим микроорганизмам, но быть безвредными для людей и животных;
- сохранять высокую токсичность в течение заданного срока;

- легко проникать в древесину на требуемую глубину;
- не ухудшать физико-механические свойства древесины, в частности не повышать ее гигроскопичность и электропроводность;
- не вызывать коррозии металлических частей, применяемых для соединения и крепления деревянных элементов;
- быть стойкими при повышенных температурах в процессе обработки древесины.

Различают антисептики, применяемые в водных растворах; антисептические пасты на основе водорастворимых антисептиков; маслянистые антисептики; антисептики, применяемые в органических растворителях.

К *антисептикам, применяемым в водных растворах*, относятся фтористый натрий **(NaF), кремнефтористый натрий** (Na_2SiF_6), кремнефтористый аммоний (NH_4SiF_6), хлористый цинк ($ZnCl_2$), пентахлорфенолят натрия, оксидифенолят натрия, уралит и др. Все перечисленные антисептики применяют для защиты только тех деревянных конструкций и изделий, которые в процессе эксплуатации надежно защищаются от увлажнения и вымывающего действия воды. Большинство из них используется для антисептирования деревянных элементов жилых, общественных и производственных зданий.

Маслянистыые антисептики применяются для консервации древесины, находящейся на открытом воздухе, в грунте или в воде, путем обмазки и пропитки. Наиболее употребляемые маслянистые антисептики следующие:

- каменноугольное креозотовое масло — темная зеленоватая флуоресцирующая жидкость, издающая тяжелый, неприятный запах, погон при дистилляции каменноугольного дегтя при 250...280 °С. Обладает сильным антисептическим действием, не улетучивается, не выщелачивается и не разрушает дерево и металл. Применяется в подогретом до 50...60 °С состоянии. При обмазке недостаточно сухой древесины масло проникает вглубь на 1...2 мм и покрывает поверхность древесины сплошным слоем, затрудняя тем самым ее просыхание;
- антраценовое масло — погон при фракционированной разгонке каменноугольного дегтя при 270...410 °С, грязного,

буровато-зеленого цвета, плотность не более 1,15. Применяется так же, как и креозотовое масло;

- каменноугольные масла — обладают резким запахом, окрашивают древесину в темный цвет, высокотоксичны для низших микроорганизмов и устойчивы к вымыванию водой;
- сланцевое масло — обладает примерно теми же свойствами, но менее токсично и легче вымывается водой.

Маслянистые антисептики используют для обработки свай, шпал, деревянных элементов мостов, эстакад и подводных сооружений. Вследствие горючести и резкого запаха их нельзя применять для обработки деревянных конструкций и изделий внутри помещений жилых, общественных и производственных зданий, подземных сооружений (в шахтах), а также деревянных элементов, примыкающих к дымоходам.

Антисептики, растворимые в органических растворителях (например, пентахлорфенол и оксидифенол), преимущественно используют для увеличения токсичности маслянистых антисептиков.

Способы пропитки древесины зависят от степени увлажнения деревянных конструкций (деталей) и учета условий их будущей работы во влажной среде (постоянное, переменное).

Различают следующие способы антисептической обработки (пропитки) деревянных конструкций и изделий:

- диффузионная пропитка;
- капиллярная пропитка;
- пропитка под давлением.

Диффузионная пропитка осуществляется (в зависимости от способа нанесения на поверхность) путем поверхностной обработки, обмазывания, опрыскивания и погружения. Поверхностную обработку антисептиками применяют в тех случаях, когда необходимо предохранить древесину от загнивания на период ее медленного высыхания в конструкции. В этих случаях используют водорастворимые антисептики в виде водных растворов концентрации не менее 8...10 %, которые наносят на деревянные изделия при помощи гидропультов и опрыскивателей. Для этого применяют древесину влажнос-

тью 40 % и выше. Антисептик растворяется и диффундирует в толщу древесины на глубину 1...2 мм.

Капиллярная пропитка осуществляется антисептиками, растворенными как в воде, так и в органических растворителях. Длительное (несколько дней) выдерживание древесины в пропиточных растворах позволяет получить требуемую глубину пропитки. При этом используют пропитку в горяче-холодных ваннах: древесину сначала помещают на несколько часов в ванну с раствором антисептика, имеющего температуру 85...95 °С, а потом быстро перекладывают в ванну с раствором, имеющим температуру 20...25 °С. В горячей ванне воздух и вода, находящиеся в древесине, расширяются и частично выделяются из древесины. В ванне с холодным антисептиком он засасывается внутрь древесины. Пропитка в горяче-холодных ваннах продолжается в течение 8...12 ч.

Пропитку под давлением (*в автоклавах*) производят под действием вакуума (разреженного воздуха) и давления. Лесоматериал загружают в пропиточный бак и герметически закрывают крышкой. В баке создается вакуум, при котором материал выдерживают 20...30 мин для удаления воздуха. Затем бак наполняют антисептиком и создают в нем давление 0,6...0,8 МПа, которое выдерживают 60 мин. После этого давление снижают и создают вакуум на 10...15 мин. Затем возвращают нормальное давление, выпускают антисептик и извлекают из бака обработанный антисептиком материал.

При пропитке древесины маслянистые антисептики (например, креозотовое масло) предварительно подогревают до определенной температуры для того, чтобы температура антисептика в баке при пропитке не снижалась ниже установленного предела.

Защиту древесины антисептиками применяют в мостовом и дорожном строительстве. Антисептиками пропитывают деревянные части мостов, трубы, лотки, столбы и другие конструктивные элементы. В табл. 11.5 приведены данные о сроках службы в неблагоприятных условиях древесины шпал, не пропитанной и пропитанной креозотовым маслом и хлоридом цинка.

Таблица 11.5

Сроки службы непропитанной и пропитанной древесины

Порода дерева	Средний срок службы древесины, годы		
	непропитанной	пропитанной креозотовым маслом	пропитанной хлоридом цинка
Сосна	6...8	20	15
Лиственница	8...10	20	—
Ель	4...5	—	10
Дуб	12...15	25	18
Бук	2...3	30	10

11.11.2. Защита древесины от поражения насекомыми

Для защиты древесины от поражения насекомыми применяют специальные материалы (*инсектициды*), которые подразделяют на две группы:

1. Материалы для защиты древесины элементов конструкций вновь строящихся зданий и сооружений: каменноугольные и сланцевые масла, раствор нафтената меди в керосине, мазуте или сольвент-нафте и др. В каменноугольное и сланцевое масла, используемые для защиты древесины от морских древоточцев, термитов и жуков-точильщиков, с целью повышения токсичности рекомендуется вводить пентахлофенол или оксидифенол.

2. Материалы для защиты древесины при хранении ее на складах, а также применяемые при ремонтных работах в случае обнаружения поражений древесины дереворазрушающими насекомыми: ГХЦГ (гексахлоран), хлорофос, хлорпикрин и др. Эти инсектициды применяют в виде дустов, суспензий, аэрозолей и в газообразном состоянии.

Проникая в древесину, инсектициды убивают личинки и самих насекомых или создают среду, в которой жизнедеятельность насекомых становится невозможной. Некоторые инсектициды токсичны для людей и животных, поэтому их следует применять с большой осторожностью.

11.11.3. Защита деревянных конструкций и изделий от возгорания

Легкая воспламеняемость древесины — один из существенных ее недостатков. При действии на древесину высоких температур она претерпевает ряд глубоких химических изменений. С химической точки зрения древесина не способна гореть, горят лишь продукты ее распада. Вначале должно быть затрачено тепло для достижения первой фазы распада древесины, затем наступает вторая фаза, при которой выделяется тепло. Горючие газы появляются при температуре 170...200 °С. Точки воспламенения для отдельных пород древесины находятся в различных температурных пределах, например для сухой сосны она равна 255 °С, для дуба — 245 °С.

Вещества, применяемые для защиты деревянных конструкций от возгорания, называют *антипиренами* (от *анти* — против и греч. ру́r — огонь). К ним относятся фосфорнокислый аммоний $(NH_4)_3PO_4$, сернокислый аммоний $(NH_4)_2SO_4$, бура $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$, борная кислота H_3BO_3.

При нагревании древесины, пропитанной антипиренами, последние разлагаются с образованием сильных кислот, в частности фосфорной или серной, которые, дегидратируя древесину, препятствуют образованию высококалорийных газов типа метана. Вследствие этого при действии высоких температур древесина не горит, а медленно разлагается (тлеет).

Некоторые из антипиренов при нагревании древесины плавятся и образуют защитные пленки, закрывающие доступ кислороду, или выделяют негорючие газы, оттесняющие кислород воздуха от поверхности древесины.

Обработка антипиренами производится теми же способами, что и антисептирование.

Кроме того, для предохранения древесины от возгорания поверхность деревянных конструкций покрывают огнезащитными красками (силикатными, хлоридными, кремнийорганическими, фосфатными и др.).

Вопросы и задания для самопроверки

1. Дайте определение термина «древесина».

2. Назовите положительные и отрицательные свойства древесины.

3. Что предоставляет собой микроструктура древесины?

4. Опишите строение дерева и древесного ствола.

5. Что предоставляет собой макроструктура древесины (поперечный разрез ствола дерева)?

6. Охарактеризуйте древесину основных пород, применяемых в строительстве.

7. Назовите примерные сроки службы древесины разных пород.

8. Перечислите физические свойства древесины.

9. Что такое усушка и разбухание древесины?

10. Приведите формулы прочности древесины на сжатие, растяжение и изгиб.

11. Какие деревянные конструкции применяются в мостостроении?

12. Расскажите о клееных деревянных конструкциях мостов.

13. Перечислите виды изделий и полуфабрикатов из древесины (сортамент).

14. Что представляют собой пороки древесины (первичные и вторичные)?

15. Опишите процессы заготовки и сушки древесины.

16. Опишите методы защиты древесины от гниения и возгорания.

12 МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

12.1. Общие сведения

Металлические материалы — вид конструкционных искусственных материалов, широко используемых во всех отраслях народного хозяйства, в том числе и в строительстве.

К металлам относится значительная группа химических элементов — из 109 известных 82 являются металлами. Наиболее распространены: алюминий (Al) — в земной коре содержится 8,8 %, железо (Fe) — 5,1 %, кальций (Ca) — 3,62 %, магний (Mg) — 2 %.

Остальные металлы (титан, натрий, цинк, олово, никель, свинец, кобальт, вольфрам, молибден, ванадий) содержатся в земной коре в малом количестве. Они не используются как конструкционные материалы, но имеют большое значение при получении сплавов.

В зависимости от состава и свойств металлические материалы подразделяются на два класса:

1) материалы из ***черных металлов*** — железо и его сплавы, обладающие в зависимости от вида и количества примесей (углерода, марганца, никеля, хрома, титана и др.) различными свойствами. Черные металлы составляют 85...90 % всех металлов, применяемых в народном хозяйстве;

2) материалы из ***цветных металлов*** — медь, свинец, цинк, алюминий, магний, олово и др., а также их сплавы.

Не окисляющиеся на воздухе металлы (золото, серебро, платина) называются *благородными*.

В строительстве главным образом используют черные металлы (сталь, чугун); в машино- и приборостроении, наряду с черными металлами, широко применяются цветные.

Для получения металлов используют ***руды***, т.е. горные породы, содержащие металлы или их оксиды и гидраты оксидов. Различают руды *металлические* (железные, медные, свинцо-

вые, цинковые и др.) и *неметаллические* (мышьяковые, баритовые, асбестовые и др.).

Чистое железо в природных условиях не встречается. Получаемое промышленное железо также не является химически чистым, а представляет собой сплав с углеродом и другими химическими элементами. В зависимости от содержания углерода сплавы делятся на две группы: стали (до 2,14 %) и чугуны (свыше 2,14 %).

Сталь — ковкий железоуглеродистый сплав. Это один из основных конструкционных строительных материалов. Из нее изготовляют строительные конструкции, трубопроводы, арматуру для железобетона.

В зависимости от входящих в сплав химических элементов, стали бывают углеродистыми и легированными.

Углеродистая сталь, кроме железа и углерода, содержит до 1 % марганца, до 0,4 % кремния, а также примеси серы и фосфора. Если количество примесей не превышает заданного верхнего предела, то стали называют *нормальными*.

Легированные стали — стали, в которые вводятся в небольшом количестве легирующие элементы: хром, никель, марганец, кремний, вольфрам, молибден, ванадий, кобальт, азот, алюминий, медь и др. Легирование повышает прочность стали, что позволяет уменьшить расход металла. Так, например, легирование стали марганцем позволяет сэкономить 15 % металла, поскольку при этом существенно повышается предел текучести (350 МПа у легированной стали против 240 МПа у углеродистой).

Поскольку в строительстве очень широко используется сварка, одним из основных требований, предъявляемых к строительным сталям, является их *свариваемость*, т.е. способность образовывать качественный, не содержащий трещин шов. Свариваемость ухудшается с увеличением содержания углерода, так как углерод делает сталь хрупкой, что увеличивает вероятность образования трещин в процессе сварки. Поэтому к строительным относятся главным образом малоуглеродистые стали (с содержанием углерода 0,1...0,25 %) марок Ст0, Ст1, Ст2, Ст3. Эти стали поставляются в горячекатаном состоянии и широко используются при строительстве мо-

стов, газо- и нефтепроводов, различных ферм и т.д. В том случае, если сварка не производится, могут использоваться стали с более высоким содержанием углерода, а следовательно, с более высокими прочностными свойствами.

Чугун — это железоуглеродистый сплав с содержанием углерода 2,14...6,67 %. В состав чугуна входят марганец, сера, кремний и фосфор. Основная масса чугуна идет на производство стали. Кроме того, его применяют как самостоятельный конструкционный материал.

В зависимости от формы связи углерода в сплаве различают белый и серый чугун.

Белый чугун содержит углерод в химически связанном состоянии в виде карбида железа Fe_3C. Этот чугун обладает высокой твердостью и хрупкостью.

В результате отжига отливок из белого чугуна получают *ковкий чугун*, где углерод приобретает форму хлопьевидного графита. Ковкий чугун маркируют буквами КЧ, затем ставят числа, показывающие значение временного сопротивления (в кгс/мм^2) и величину относительного удлинения (в %): КЧ 30-6, КЧ 60-3 и т.п.

Белый чугун хорошо сопротивляется износу, но плохо поддается обработке режущим инструментом. Белый чугун используется для получения ковкого чугуна и в строительстве применяется мало.

Серый чугун характеризуется тем, что углерод в нем находится в свободном состоянии — в виде пластинчатого или волокнистого графита. Такой чугун маркируют буквами СЧ и цифрами, показывающими гарантируемое значение временного сопротивления (в кгс/мм^2): СЧ 15, СЧ 25, СЧ 35, СЧ 5. Для стальных конструкций в качестве опор применяются отливки из серого чугуна марок СЧ 15, СЧ 25, СЧ 30.

12.2. Структура и свойства металлов

Структура металлов обусловлена наличием в их кристаллической решетке большого числа свободно перемещающихся электронов, которые не связаны или слабо связаны с положительно заряженными ядрами атомов и принадлежат всему объему материала в целом. Эти электроны образуют «электронный газ», который свободно двигается между ионами и скрепляет их друг с другом. Такая способность металлической связи определяет стремление атомов металлов располагаться как можно плотнее.

Компактная упаковка атомов приводит к повышенной плотности металлов, что обусловливает их характерные свойства:

- высокий модуль упругости (модуль Юнга);
- высокую электропроводность;
- высокую теплопроводность;
- высокую пластичность;
- высокую температуру плавления.

Свойства некоторых металлов представлены в табл. 12.1.

Таблица 12.1

Физические свойства металлов

Металл, сплав	Плотность, кг/м^3	Модуль упругости, Н/мм^2	Относительное удлинение, %	Температура плавления, °С	Временное сопротивление, МПа
Алюминий	2700	0,71	40	660	80
Железо	7874	2,17	40	1539	280
Магний	1740	—	5	651	180
Медь	8960	1,21	50	1083	220
Никель	8900	—	40	1453	450
Сталь	—	2,2	—	—	—
Чугун	—	0,8...1,6	—	—	—

Металлы и сплавы в твердом состоянии имеют кристаллическое строение, которое характеризуется определенным закономерным расположением атомов. Атомы в кристалле металла образуют пространственную *кристаллическую решетку*, состоящую из многократно повторяющихся ячеек, имеющих относительно простую форму.

Обычно металлы используют не в чистом виде, а в виде сплавов. ***Металлические сплавы*** образуются в результате затвердевания жидких расплавов, состоящих из двух или нескольких компонентов. Компоненты, входящие в состав сплава, представляют собой химически индивидуальные вещества или их устойчивые соединения. Металлические сплавы могут состоять либо только из металлов (например, сплав меди и цинка — латунь), либо из металлов с небольшим количеством неметаллов (например, сплав железа с углеродом — чугун и сталь).

После затвердевания в составе сплавов могут образоваться твердые растворы, химические соединения или механические смеси.

Твердые растворы образуются в результате проникновения в кристаллическую решетку основного металла (растворителя) атомов другого металла или неметалла (растворяемого компонента). По типу расположения атомов растворяемого компонента в кристаллической решетке растворителя различают твердые растворы замещения и внедрения.

Твердый раствор замещения образуется в результате замены части атомов в кристаллической решетке основного металла атомами растворяемого компонента. Примерами твердых растворов замещения служат сплавы меди с никелем, железа с никелем, хромом, кремнием, марганцем.

Твердый раствор внедрения образуется, если атомы растворенного компонента размещаются в свободных промежутках между атомами основного металла. Обычно это происходит в системе, состоящей из металла и неметалла (например, в сплаве железа с углеродом). У металлов, образованных по принципу твердых растворов, повышается прочность, твердость, электрическое сопротивление, но при этом понижается пластичность.

Твердые растворы являются основой технических сплавов: конструкционных, нержавеющих и кислотоупорных сталей, бронз и латуней.

Химические соединения образуются при сохранении строгого количественного соотношения компонентов. Примером химического соединения является карбид железа (цементит), который входит в состав сплава железа с углеродом ($3Fe + C = Fe_3C$). Он характеризуется высокой прочностью и твердостью, но очень хрупок.

Примерами химических соединений металла с металлом (интерметаллические химические соединения) являются соединения алюминия с медью $CuAl_2$, магния с цинком $MgZn_2$ и др. Присутствие химических соединений упрочняет сплавы, но одновременно снижает их пластичность.

Механические смеси образуются в результате срастания кристалликов чистых элементов, твердых растворов или химических соединений. В кристаллах, входящих в состав механической смеси, сохраняется кристаллическая решетка исходных компонентов сплава. Таким образом, каждый из компонентов сохраняет свои специфические свойства.

Установлено, что большинство металлов имеет зернистую структуру. Зерна имеют неправильную форму размером в десятые доли миллиметра и представляют собой отдельные кристаллы. Таким образом, даже малый образец металла состоит из большого количества различным образом ориентированных кристаллов, соединяющихся между собой общими для них границами.

Структура реальных сплавов существенно отличается от идеального строения кристаллов. В реальном металле всегда есть нарушения макро- и микроскопического характера (поры, газовые и неметаллические примеси, микротрещины и пр.), а также дефекты кристаллического строения, связанные с нарушением правильного расположения атомов в самой кристаллической решетке. Все эти виды нарушений структуры (особенно несовершенство кристаллического строения) обобщенно называются ***дислокациями***.

Вследствие присутствия в металле дислокаций его теоретическая прочность не реализуется. Прочность реальных кри-

сталлов обычно составляет не более 1...5 % теоретической, рассчитанной по силам связи между атомами. В конструкции же, когда на эксплуатационные характеристики металла оказывают влияние такие факторы, как наличие надрезов, напряженное состояние, температурные условия эксплуатации, агрессивность окружающей среды, как правило, используется только 40...80 % прочности исходного металла. Все это делает очень актуальным создание материалов с высоким уровнем эксплуатационных *свойств*.

В зависимости от условий применения и назначения металлов для их характеристики определяют следующие *свойства*:

- физические — плотность, электропроводность, теплопроводность и др.;
- химические — растворимость, коррозионная стойкость;
- механические — прочность, твердость, упругость, вязкость, пластичность, хрупкость;
- технологические — ковкость, свариваемость, обрабатываемость.

Основными характеристиками металла, оказывающими определяющее влияние на эксплуатационные свойства, являются прочность, пластичность, ударная вязкость, усталостная прочность (для конструкций, подверженных знакопеременному нагружению), температура перехода в хрупкое состояние $T_{хр}$ (порог хладноломкости).

Характеристики прочности и пластичности обычно определяются на стандартных образцах при испытании на разрыв. Ими являются: предел прочности $\sigma_в$, условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, условный предел упругости $\sigma_{0,05}$, относительное удлинение δ (для оценки пластичности).

Предел прочности — максимальное напряжение, которое образец выдерживает до разрушения.

Условный предел текучести соответствует напряжению, вызывающему остаточную деформацию 0,2 %. Этот показатель введен в связи с тем, что в металлах повышенной прочности площадка текучести не всегда четко регистрируется, в связи с чем определение физического предела текучести становится неопределенным.

Условный предел упругости соответствует напряжению, вызывающему остаточную деформацию 0,05 %.

Твердость определяется как сопротивление материала вдавливанию в него постороннего тела (шарика, конуса, пирамиды) при приложении определенной нагрузки.

Испытание на *ударный изгиб* производится на маятниковых копрах: таким образом определяют работу, затраченную на разрушение образца, и относят ее к его поперечному сечению. Легко разрушающиеся металлы относятся к хрупким, а хорошо сопротивляющиеся ударам — к вязким.

Испытание на *усталость* (*выносливость*) производится на специальных машинах, обеспечивающих знакопеременные напряжения: изгиб, поперечное сжатие и растяжение, кручение и ударную нагрузку. Технологические пробы определяют возможность выполнять различные технологические операции, связанные с деформацией металла. Для этого производят испытания на вдавливание, перегиб, осадку, свариваемость и др.

12.3. Основы технологии черных металлов

Для получения черных металлов (чугуна и стали) необходимо определенное сырье. Таким сырьем являются железные руды, представляющие собой природную смесь рудного материала (оксидов железа) и пустой породы. Алгоритм производства чугуна и дальнейшая его переработка в сталь для изготовления различных изделий показан на рис. 12.1.

12.3.1. Получение чугуна

Чугун получают из железных руд при высоких температурах в результате восстановительных процессов, т.е. отнятия кислорода от оксидов железа. Наиболее ценными рудами для получения чугуна считаются: магнитный железняк Fe_3O_4, красный железняк Fe_2O_3, бурый железняк $2Fe_3O_3 \cdot 3H_2O$, шпатовый железняк $FeCO_3$.

Рис. 12.1. Схема получения черных металлов и изделий из них

Разработке подвергают преимущественно руды, содержащие незначительное количество вредных примесей (фосфора, серы, мышьяка) и пустой породы (глины, песка и др.).

Для получения чугуна железные руды перерабатывают в ***доменных печах*** (рис. 12.2). Домна — шахтная печь высотой до 30 м и более, шириной 6 м. Ее стенки выложены из огнеупорного кирпича, снаружи кладка заключена в стальной кожух толщиной 20...40 мм.

Исходными материалами для доменной плавки являются руда, флюсы (плавни) и топливо (кокс), которые загружаются в доменную печь сверху в количествах, определяемых расчета-

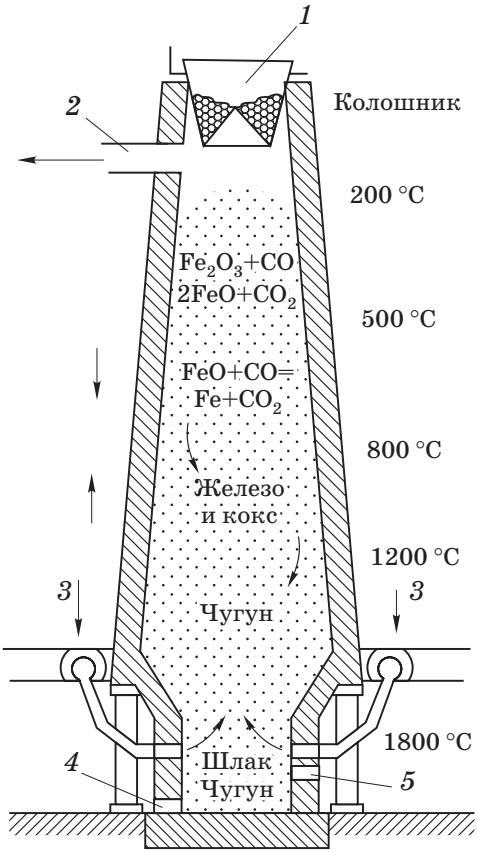


Рис. 12.2. Схема доменной печи:
1 — загрузочное устройство; *2* — газоотводная труба; *3* — фурмы для подачи воздуха; *4* — лётка для выпуска жидкого чугуна; *5* — лётка для выпуска расплавленного шлака

ми. Смесь этих материалов называется *шихтой*. Загружаемое в один прием количество руды, кокса и флюсов (известняк, доломит) называется «подачей» или «колошей». Отсюда и название верхней части доменной печи — «колошник».

Флюсы — это материалы минерального происхождения, вводимые в шихту для образования шлака. Флюсы способ-

ствуют переходу в шлак вредных для металла примесей. По химическому составу различают основные (известняк), кислые (кремнезем) и нейтральные (глинозем) флюсы.

Температура плавления и превращения пустой породы в шлак обычно очень высока. Для ее понижения в состав шихты вводят специальные добавки (плавни).

В доменной печи происходят следующие основные процессы:

- горение углерода топлива;
- удаление из сырых материалов влаги и летучих веществ;
- восстановление и науглероживание железа;
- плавление восстановленного и науглероженного металла и отшлаковывание пустой породы и флюсов.

Шихту непрерывно подают в верхнюю часть домны через загрузочное устройство. В нижней части домны сгорает кокс (для этого через фурмы *3* подают горячий воздух):

$$C + O_2 = CO_2.$$

Углекислый газ, поднимаясь, соприкасается с раскаленным коксом и переходит в угарный газ:

$$CO_2 + C = 2CO,$$

который еще выше в домне взаимодействует с раскаленной рудой:

$$CO + Fe_2O_3 = 2FeO + CO_2.$$

В результате образуется восстановленное железо:

$$FeO + CO = Fe + CO_2.$$

Таким образом, углерод кокса при высоких температурах восстанавливает железную руду до чистого железа.

Восстановленное железо насыщается углеродом (науглероживается примерно до 3,5...4 %), превращаясь в чугун:

$$3Fe + 2CO = Fe_3C + CO_2.$$

Это происходит при температуре 1250 °С. Чугун стекает в нижнюю часть домны, откуда его выпускают через специальное отверстие — *лётку*.

Продукты плавки — чугун и шлак — периодически выпускают через лётки *4*, *5* в ковш.

При доменном производстве на каждую тонну чугуна получают около 0,6 огненно-жидкого шлака, являющегося ценным сырьем для промышленности строительных материалов. Из него получают шлакопортландцемент, шлаковую пемзу, шлаковую вату, шлаковый щебень и др.

Запущенная в действие доменная печь функционирует непрерывно в течение нескольких лет. Современная доменная печь за сутки выплавляет 12 000 т чугуна и выдает около 4000 т шлака и 27 000 т колошникового газа.

Руду, кокс и флюсы периодически добавляют через верхнее отверстие (колошник) домны. Также периодически (через 4...6 ч) производится выпуск из нее чугуна и шлака. При этом 99...99,8 % железа переходит в чугун и только 0,2...1 % — в шлак.

По назначению доменные чугуны разделяют на литейный, передельный и специальный.

Литейный чугун переплавляют и из него отливают чугунные элементы строительных конструкций: тюбинги для тоннелей, опорные части железобетонных ферм и балок, санитарно-технические изделия (ванны, мойки, канализационные трубы).

Передельный чугун предназначен для переработки в сталь. На долю передельных чугунов приходится свыше 80 % всей продукции доменных печей.

Специальные чугуны (*доменные ферросплавы*) содержат кремний или марганец в повышенном количестве и их используют как добавки при выплавке стали.

В чугуны часто вводят медь, алюминий, титан, хром, никель. Подобно сталям такие чугуны называют *легированными*.

12.3.2. Получение стали

Процесс выплавки стали включает в себя обезуглероживание чугуна, а также освобождение его от загрязняющих примесей и введение полезных. Сталь получают главным образом в жидком состоянии (литая сталь).

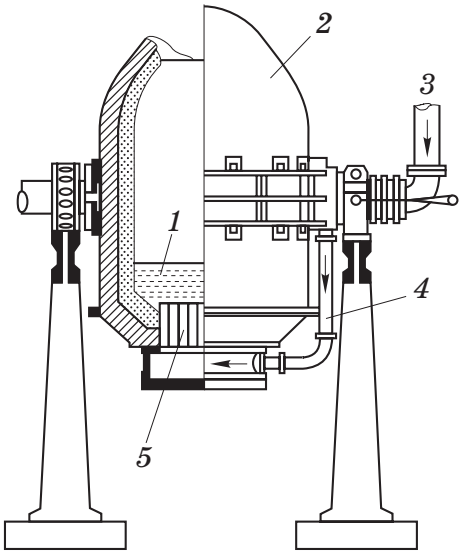


Рис. 12.3. Конвертор для выплавки стали:
1 — чугун; *2* — набойка; *3* — воздух; *4* — дутье;
5 — фурмы для подачи воздуха в металл

По способу выплавки стали делятся на конверторные, мартеновские и электростали.

При *конверторном способе* расплавленный чугун продувают сжатым воздухом или кислородом в больших грушевидных сосудах-конверторах с внутренней огнеупорной футеровкой (рис. 12.3). Под давлением 0,8...1,2 МПа подают кислород. Металл разогревается до температуры 3000 °С, поэтому в конвертор можно вводить не только жидкий чугун, но и металлический лом.

При *мартеновском способе* (рис. 12.4) выплавку стали ведут на поду пламенной отражательной печи. Топливо (газ) и воздух, предварительно подогретые в регенераторах, поступают в рабочее пространство и, воспламеняясь, образуют стелющееся пламя, тепловой поток которого, отражаясь от свода на перерабатываемый чугун, расплавляет его При плавке проис-

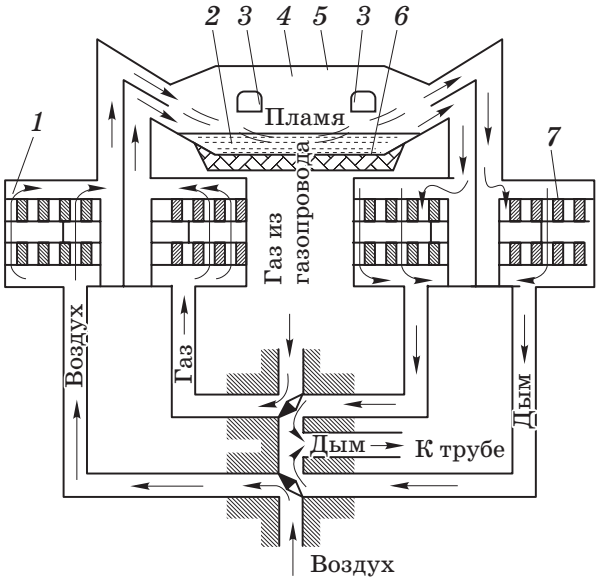


Рис. 12.4. Схема мартеновской печи:
1, *7* — регенераторы; *2* — расплавленные шлак и металл; *3* — завалочные окна; *4* — рабочее пространство; *5* — свод; *6* — под

ходит выгорание и окисление нежелательных примесей в чугуне, и они переходят в шлак.

При получении стали *электроплавкой* (специальные стали) используют электродуговые, индукционные и высокочастотные печи (рис. 12.5).

Получение стали в электрических печах по сущности протекающих процессов не отличается от мартеновского. Нагрев в дуговых электропечах (более распространенных) происходит за счет тепла, выделяемого электрической дугой, образующейся между электродами и расплавленным металлом. При этом способе можно получать высокую температуру расплава (до 2000 °С), регулировать процесс плавки, вводить тугоплавкие добавки и получать высококачественные стали (высокоуглеродистые, нержавеющие, кислото- и жароупорные) для самых ответственных изделий.

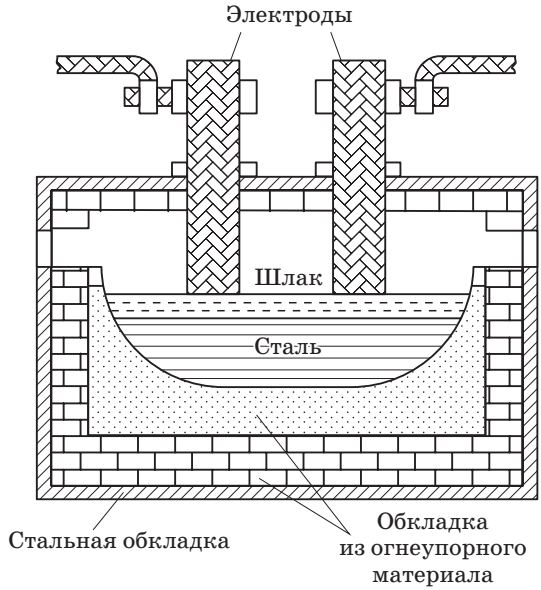


Рис. 12.5. Схема электрической печи для выплавки специальных сталей

В заключение можно отметить, что в мире в конверторах выплавляется более 50 % стали, причем эта доля имеет тенденцию к непрерывному увеличению, тогда как доля мартеновской выплавки постепенно снижается.

12.4. Стали, применяемые в строительстве

Конструкционные стали. Стали, применяемые в строительстве, называют ***конструкционными***. В них содержится не более 0,5...0,6 % углерода. Они могут быть углеродистыми и легированными, обладающими высокими механическими свойствами. ***Углеродистой*** называют нелегированную сталь, содержащую 0,04...2 % углерода. Кроме того, в ее состав входят постоянные примеси — кремний и марганец, а также вредные — фосфор и сера (их содержание не должно превышать 0,05...0,06 %). В зависимости от содержания углерода такие стали делятся на низко- (до 0,25 % углерода), средне- (до

0,25...0,6 %) и высокоуглеродистые (свыше 0,65 %). С повышением содержания углерода уменьшается пластичность и повышается твердость стали; ее прочность также возрастает, но при содержании углерода более 1 % вновь снижается. Повышение прочности и твердости стали объясняется увеличением содержания в ней твердого компонента — цементита. Стали разделяют на сталь общего назначения и сталь качественную.

Углеродистые стали общего назначения при плавке меньше очищают от вредных примесей, чем качественные стали, и поэтому они содержат больше серы и фосфора. Из них отливают крупные слитки, применяют для изготовления горячекатаного проката (балок, швеллеров и уголков, листов, прутков), а также строительных конструкций.

Углеродистые *качественные стали* имеют более высокие показатели качества и химического состава, чем стали общего назначения. Их применяют для сварных конструкций в мостостроении, судостроении, машиностроении.

По назначению углеродистые стали подразделяются на конструкционные и инструментальные.

Конструкционные стали содержат не более 0,65 % углерода. Их применяют для изготовления арматуры железобетонных конструкций.

Используемые в строительстве конструкционные углеродистые стали подразделяют на стали обыкновенного качества, качественные и специальные.

Сталь углеродистую обыкновенного качества подразделяют на группы А, Б, В, учитывающие условия поставки. Для стали группы А нормируют механические свойства (пределы прочности и текучести, относительное удлинение, способность к изгибу в холодном состоянии), группы Б — химический состав, группы В — одновременно химический состав и механические свойства.

Каждая группа включает несколько марок стали — от Ст0 до Ст6. С увеличением номера возрастает прочность стали и уменьшается ее пластичность.

Легированными или ***специальными*** называют стали, в которые вводят легирующие элементы (от греч. «лега» — сложное). Легирующими называют элементы, специально вводи-

мые в сталь для изменения ее структуры и свойств. Cu, Si, Cr, Mo, Ni и др. повышают у стали коррозионную стойкость; Si, Cr, **W, Ni, Mn и др. — твердость и прочность; V, Co, Ni — вязкость**; Cr, Ni, Mn — сопротивление истиранию и т.д.

Конструкционные строительные низколегированные стали отличаются коррозионной стойкостью и применяются для изготовления строительных стальных конструкций (ферм мостов, нефтепроводов, газопроводов и др.), а также арматуры для железобетонных конструкций.

В железобетонных конструкциях применяют простые углеродистые стали и низколегированные арматурные стали в виде проволоки и стержней гладких или периодического профиля. Ненапряженные железобетонные конструкции, в которых сталь испытывает небольшие напряжения, армируют простыми углеродистыми сталями и низколегированными сталями.

Свойства сталей. Широкому использованию в строительстве сталь обязана своим высоким физико-механическим показателям, технологичности (возможности получения из нее конструкций различными методами) и большим объемом производства. Сталь обладает рядом характерных свойств.

Плотность стали 7850 кг/м^3, что приблизительно в три раза выше плотности каменных материалов.

Прочность и деформативные свойства обычно определяются испытанием стали на растяжение. При этом строится диаграмма «напряжение — деформация». Сталь, как и другие металлы, ведет себя как упругопластичный материал (рис. 12.6). В начале испытаний деформации у стали пропорциональны напряжениям. Максимальное напряжение, при котором сохраняется эта зависимость, называется *пределом пропорциональности* $\sigma_у$ (при этом напряжении остаточные деформации не должны превышать 0,05 %).

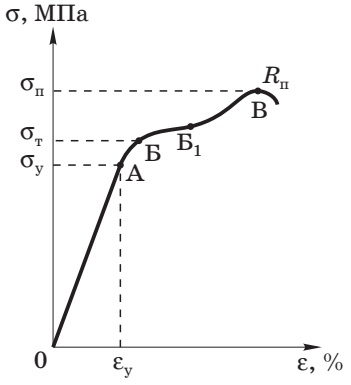


Рис. 12.6. Диаграмма деформации стали при растяжении

При дальнейшем повышении напряжения начинает проявлять-

ся текучесть стали — быстрый рост деформаций при небольшом подъеме напряжений. Напряжение, соответствующее началу течения, называют *пределом текучести* $\sigma_т$.

Затем наступает некоторое замедление роста деформаций при подъеме напряжений («временное упрочнение»), после чего происходит разрушение образца. Наибольшее напряжение называется *временным сопротивлением* $\sigma_п$, что является фактическим пределом прочности стали $R_п$.

Относительное удлинение стали ε в момент разрыва характеризует ее пластичность. Оно рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100, \qquad (12.1)$$

где l_0 — начальная длина расчетной части образца, мм; l_1 — длина этой части в момент разрыва образца, мм.

Испытание на растяжение является основным при оценке механических свойств сталей.

Модуль упругости стали составляет $2{,}1 \cdot 10^5$ МПа.

Твердость сталей определяют на твердомерах Бринелля (НВ) или Роквелла (HR) по величине вдавливания индентора (закаленного шарика или алмазной пирамидки) в испытуемую сталь. Твердость поверхности стали можно повышать специальной обработкой (например, цементацией — насыщением поверхностного слоя стали углеродом или закалкой токами высокой частоты).

Ударная вязкость — свойство стали противостоять динамическим (ударным) нагрузкам. Ее значение определяют по величине работы, необходимой для разрушения образца на маятниковом копре. Ударная вязкость зависит от состава стали, наличия легирующих элементов и заметно меняется при изменении температуры. Так, у Ст3 ударная вязкость при +20 °С составляет 0,5...1,0 МДж/м^2, а при −20 °С — 0,3...0,41 МДж/м^2. Ударная вязкость пластичных материалов выше, чем хрупких; с понижением температуры ударная вязкость падает.

С помощью технологических испытаний обнаружена способность стали принимать определенные деформации, аналогичные тем, которые стальное изделие будет иметь при дальнейшей обработке или в условиях эксплуатации. Для строительных сталей чаще всего производят пробу на *холодный изгиб*.

Теплопроводность стали, как и всех металлов, очень высока и составляет около 70 Вт/(м·°С).

Коэффициент линейного термического расширения стали составляет $11{,}7 \cdot 10^{-6}$ К.

Температура плавления стали зависит от ее состава и для обычных углеродистых сталей находится в пределах 1500...1300 °С (чугун с содержанием углерода 4,3 % плавится при 1150 °С).

Температуроустойчивость стали связана с тем, что при нагревании в ней происходят полиморфные превращения, приводящие к снижению прочности. Небольшая потеря прочности наблюдается уже при нагреве выше 200 °С. После достижения температуры 500...600 °С обычные стали становятся мягкими и резко теряют прочность. Поэтому стальные конструкции не огнестойки и их необходимо защищать от действия огня, например, покрытием цементными растворами.

Сортамент стального проката. ***Сортаментом*** называют совокупность профилей (форм поперечного сечения изделий) и размеров изделий. ***Прокатом*** называются детали и изделия, изготовленные способом прокатки. Прокатка металла происходит при прохождении его между двумя валками прокатного стана, вращающимися в противоположные стороны. При этом металл под давлением валков обжимается, вследствие чего уменьшается толщина полосы и увеличиваются ее ширина и длина. Основную массу прокатных стальных изделий прокатывают в горячем состоянии при температуре 900...1250 °С (горячая прокатка), небольшую их часть — в холодном состоянии (холодная прокатка). Путем прокатки изготавливают листы, квадратный и круглый профили, швеллеры, рельсы, балки и др. (рис. 12.7).

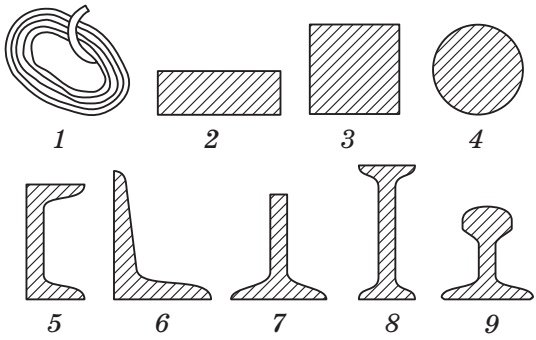


Рис. 12.7. Основные профили сортовой прокатной стали: *1* — круглая гладкая проволока; *2* — полосовой; *3* — квадратный; *4* — круглый; *5* — швеллерный; *6* — угловой; *7* — тавровый; *8* — двутавровый; *9* — рельсовый

Стальной прокат широко применяется в строительстве зданий, сооружений, мостов, на железнодорожном транспорте, в других отраслях производства.

Стальной прокат разделяют на четыре основные группы: листовая сталь, сортовая сталь, специальные виды стали и трубы.

Листовую сталь разделяют на два основных вида: тонколистовую — листы толщиной меньше 4 мм и толстолистовую — листы толщиной больше 4 мм. Эта сталь имеет разнообразное применение.

Сортовая сталь разделяется на два вида: профили общего назначения (лента, полосовая, квадратная и угловая сталь, проволока различного профиля, швеллеры, двутавровые балки и др.) и профили специального назначения (шпунты, рельсы и др.). Среди всей прокатной продукции наибольшую часть составляет сортовая сталь (около 50 %).

К *специальным видам проката* (рис. 12.8) относятся периодические профили (попеременное поперечное сечение по длине проката), гнутые профили, цельнокатаные колеса, бандажи и др. К периодическим профилям проката относится, в частности, применяемая в железобетоне арматурная сталь. Гнутые профили изготавливают из ленты или листа толщиной 0,2...20 мм; они весьма широко применяются в строительстве — в оконных переплетах, в строительных конструкциях и др.

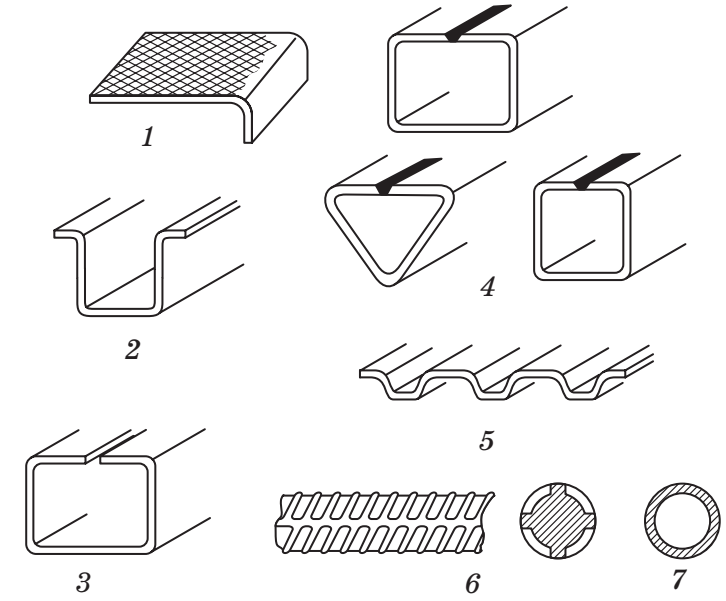


Рис. 12.8. Основные специальные виды стального проката: *1* — накатанный гнутый профиль; *2* — корытный гнутый профиль; *3* — замкнутый несварной гнутый профиль; *4* — замкнутый сварной гнутый профиль; *5* — гофрированный листовой гнутый профиль; *6* — сталь горячекатаная периодического профиля для армирования железобетонных конструкций (арматурная сталь); *7* — трубы

Стальные трубы выпускаются бесшовные и сварные, причем в настоящее время производство сварных труб быстро увеличивается.

12.5. Термическая и химико-термическая обработка сталей

Для упрочнения изделий из металлов на практике широко применяются различные термические и химико-термические способы обработки.

12.5.1. Термическая обработка сталей

Термической обработкой сталей называются процессы, связанные с нагревом и охлаждением сплавов, находящихся в твердом состоянии, при которых можно менять их структуру и свойства (твердость, сопротивление разрыву, предел упругости, вязкость). Процесс термической обработки складывается из нагревания изделия с той или иной скоростью до заданной температуры, выдерживания изделия при заданной температуре до полного его нагрева по всему сечению, завершения в нем фазовых превращений и дальнейшего охлаждения с различной скоростью.

Научное обоснование процессов, происходящих при термической обработке сталей, оказалось возможным благодаря открытию Д.К. Черновым «критических точек», соответствующих структурным превращениям при нагревании и охлаждении стали.

Видами термической обработки являются закалка, отпуск, отжиг и нормализация. Так как все термические процессы связаны с изменениями, происходящими в твердом растворе при нагревании, выдерживании при этой температуре и последующем охлаждении, то качество металла зависит от точности соблюдения теплового режима. Для контроля за температурой используют электрические пирометры.

Закалка — вид термической обработки стальных изделий (нагрев, а затем быстрое охлаждение), после чего металл находится в так называемом *неравновесном* структурном состоянии, не свойственном ему при нормальной температуре (20 °С).

При закалке сталь охлаждают в различных жидкостях, закаливающее действие которых зависит от их температуры, теплопроводности, теплоемкости и вязкости. Обычно для закалки углеродистых сталей применяют воду с температурой 12...15 °С. Скорость охлаждения в значительной мере меняется при наличии в воде примесей. Например, примеси кислоты (особенно серной), 10%-ного раствора **NaOH и NaCl увеличи**вают скорость охлаждения, а добавление спирта и мыла — замедляют. Замедленное охлаждение получается при использовании минеральных масел (особенно растительных).

Закалка стали увеличивает ее твердость, но резко снижает ударную вязкость и относительное удлинение. Увеличивается при этом и хрупкость. Поэтому для уменьшения хрупкости и ослабления внутренних напряжений сталь после закалки обязательно подвергают отпуску.

Отпуск — вид термической обработки стали, осуществляемый после закалки и представляющий собой нагрев до некоторой температуры с последующим охлаждением (как правило, на воздухе или в воде). Целью отпуска является уменьшение внутренних напряжений, возникающих в изделии при закалке, и понижение хрупкости и твердости уже закаленной стали.

Отжиг — вид термической обработки, заключающийся в нагреве стали, структура которой находится в неустойчивом состоянии в результате предшествующих обработок, в выдержке при температуре нагрева и последующем охлаждении для получения структур, близких к равновесному состоянию. Цель отжига — подготовить структуру стали для улучшения ее обрабатываемости, повышения пластичности, уменьшения остаточных напряжений.

Полному отжигу подвергают сортовой прокат, фасонные изделия из углеродистой и легированной сталей.

Нормализация — вид термической обработки стали, заключающийся в ее нагреве (примерно до 750...950 °С), выдержке и последующем охлаждении на воздухе.

Нормализация стали применяется для устранения крупнозернистой структуры, полученной в результате предшествующей обработки (прокатки, ковки, штамповки), некоторого повышения прочности среднеуглеродистой стали по сравнению с отожженной, облегчения обрабатываемости резанием низкоуглеродистой стали, исправления структуры сварного соединения и уменьшения внутренних напряжений.

Нормализация широко применяется для улучшения свойств стальных отливок.

12.5.2. Химико-термическая обработка стали

Химико-термическая обработка представляет собой сочетание химического воздействия и термической обработки с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностного слоя стали.

Деталь помещают в среду с большим содержанием химического элемента, диффундирующего в металл при высокой температуре. В результате поверхностный слой насыщается химическими элементами (C, N, Al, Cr, Si и др.).

К химико-термической обработке относятся: цементация, азотирование, цианирование, диффузионная металлизация стали.

Цементация — диффузионное насыщение поверхностного слоя стали углеродом при температуре 930...950 °C, в результате чего слой становится высокоуглеродистым. После цементации производят закалку и отпуск изделия, благодаря чему достигается достаточно высокая твердость и износостойкость стали. Для цементации используют CO и CH_4.

Содержание углерода в поверхностном слое достигает 0,8...1 %.

Азотирование — диффузионное насыщение поверхностного слоя атомарным азотом ($N_{ат}$) при температуре 500...650 °C в среде аммиака (NH_3):

$$NH_3 \rightarrow N_{ат} + 3/2H_2.$$

В результате достигается большая твердость, износостойкость стали.

Цианирование — совместное диффузионное насыщение поверхностного слоя стали углеродом (C) и азотом (N). Наиболее широко применяется жидкое цианирование в расплавленных солях NaCN, NaCl, Na_2CO_3.

Поверхностный слой стали насыщают углеродом (0,8...1,2 %) и азотом (0,2...0,3 %).

Диффузионная металлизация стали — это диффузионное насыщение поверхностного слоя стали металлами: Ni, Cr, Zn, Al.

Алитирование — насыщение поверхностного слоя стали алюминием. При нагреве алитированного изделия на его поверхности образуется плотная пленка Al_2O_3, предохраняющая

сталь от окисления, но такой слой обладает низкой износостойкостью.

Хромирование — насыщение поверхностного слоя стали хромом при температуре 800 °С. При этом образуется карбид хрома, который обеспечивает хорошую износостойкость стали в агрессивных средах.

Цинкование — насыщение поверхностного слоя стали цинком при нагреве до 300...500 °С. Образующееся соединение $FeZn_3$ защищает стальные изделия от коррозии (проволока, листы, трубы, дорожные стальные ограждения и др.).

12.6. Обработка металлов давлением и резанием

Для получения готовых изделий из металлов широко используют различные способы обработки давлением и резанием.

12.6.1. Обработка металлов давлением

Обработка металлов давлением основывается на использовании их пластических свойств, т.е. способности деформироваться под действием внешних сил и сохранять приданную им форму.

При обработке металлов давлением изменяются не только форма исходной заготовки, но и ее структура и механические свойства. Для облегчения обработки металлов и сплавов давлением их предварительно нагревают. Каждый металл и сплав имеет оптимальную температурную зону нагрева: алюминиевые сплавы — 350...500 °С, сплавы меди — 800...1000 °С, стали — 1000...1250 °С (в зависимости от химического состава). Правильный нагрев металла перед обработкой давлением обеспечивает получение мелкозернистой структуры, а пластическая деформация устраняет дефекты литой структуры, приводит к уплотнению металла и повышению его механических свойств.

Основные виды обработки металлов давлением — прокатка, волочение, прессование, ковка, горячая объемная и листовая штамповка.

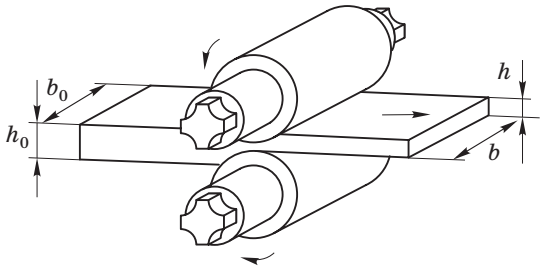


Рис. 12.9. Схема обработки металла прокаткой

Прокатка — деформирование металла путем пропускания заготовки между вращающимися валками, зазор между которыми меньше толщины обрабатываемой заготовки. Металл захватывается валками (благодаря трению между металлом и валками) и происходит деформация и движение заготовки в направлении подачи (рис. 12.9). При прокатке плоской заготовки толщина ее уменьшается, а длина и ширина увеличиваются. Прокаткой получают листовой и сортовой прокат простого и фасонного профилей.

Волочение — протягивание заготовки (прутка или трубы) через коническое отверстие размером, несколько меньшим, чем сечение заготовки (рис. 12.10). Многократным волочением изготовляют высокопрочную проволоку, трубы и т.д.

Прессование — выдавливание металла заготовки через профильное отверстие замкнутой формы для получения изделий определенной формы и сечения. Применяется для обработки главным образом цветных металлов и их сплавов.

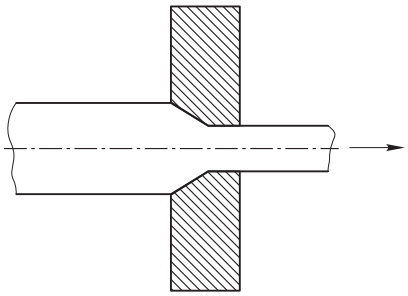


Рис. 12.10. Схема обработки металла волочением

Ковка (свободная) — свободное деформирование нагретой заготовки последовательными ударами молота или нажимами пресса. Свободная ковка является наиболее простым и широко распространенным видом обработки давлением.

Горячая объемная штамповка — деформирование нагретой заготовки в штампе, соответствующем по форме конфигурации изделий. Производительность объемной штамповки по сравнению со свободной ковкой выше в 50 раз и более. Этот метод намного экономичнее свободной ковки, при этом качество и точность поковки повышаются.

Листовая штамповка выполняется преимущественно на прессах для обработки листового, ленточного и полосового материалов путем вырезки полосы, вытяжки пустотелых, открытых с одной стороны изделий и т.д. В последнее время внедряется штамповка массивных деталей методом взрыва, который более экономичен по сравнению с другими методами.

12.6.2. Обработка металлов резанием

Обработка металлов литьем, ковкой, штамповкой не всегда обеспечивает заданную точность размеров и чистоту поверхности. В этих случаях окончательная обработка изделий производится ***резанием*** (рис. 12.11). Обработка резанием основана на снятии слоя металла с заготовки режущим инструментом и доведении размеров и чистоты поверхности до заданных.

Современная металлообрабатывающая промышленность располагает большим количеством различных типов универсальных и специальных станков, от самых простых до сложных автоматов с программным управлением и автоматизированными линиями.

Токарные станки предназначаются для обработки внутренней и наружной поверхностей деталей. При этом обрабатываемая деталь совершает вращательное движение, а режущий инструмент (резец, сверло) — поступательное (рис. 12.11, *а*).

На фрезерных станках обрабатывают поверхности сложной конфигурации. При работе станков многорезцовый ин-

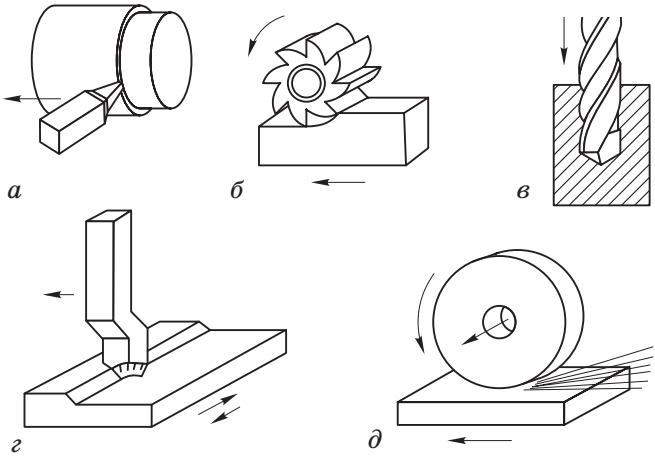


Рис. 12.11. Виды обработки металлов резанием:
а — токарная; *б* — фрезерная; *в* — сверлильная; *г* — строгальная; *д* — шлифовальная

струмент — фреза совершает вращательное движение, а деталь — поступательное (рис. 12.11, *б*).

Сверлильные станки предназначены для обработки отверстий. На этих станках деталь неподвижна, а инструмент осуществляет вращательное и поступательное движение (рис. 12.11, *в*).

На *строгальных станках* обрабатывают поверхности детали. При строгании деталь и инструмент совершают поступательное движение (рис. 12.11, *г*).

Шлифовальные станки служат для точной обработки деталей. На них поступательные и вращательные движения могут производить и деталь, и инструмент (рис. 12.11, *д*).

Зуборезные станки предназначены для обработки зубчатых колес. При этом инструмент совершает одновременно вращательное и поступательное движение, а деталь — только вращательное.

Протяжные станки срезают с обрабатываемой поверхности стружку с помощью многолезвенного режущего инструмента — протяжки.

Автоматические линии позволяют объединить отдельные станки и силовые головки с помощью различных транспор-

тирующих устройств. В автоматических линиях станки располагаются в строгой последовательности в соответствии с технологическим процессом и заготовка автоматически передается от операции к операции.

При обработке металлов резанием необходимо обращать особое внимание на технику безопасности. Основными причинами травматизма при холодной обработке металлов являются движущиеся механизмы станка, отходящая стружка, обрабатываемая деталь, режущий инструмент, токоведущие части электроустановок и плохая организация рабочего места.

12.7. Сварка и резка металлов

Сварка — процесс получения неразъемного соединения с местным нагревом или без него при использовании сил молекулярного сцепления. Применение сварки дает экономию металла (она намного экономичнее клепки, литья). Сварка широко используется в промышленности и строительстве. С ее помощью изготавливают металлические конструкции, арматурные каркасы, металлические резервуары, мостовые фермы и другие изделия.

При сварке различают следующие *виды соединений*: стыковые, внахлестку, угловые, тавровые (рис. 12.12).

В зависимости от способа соединения металла в момент сварки различают два основных ее вида:

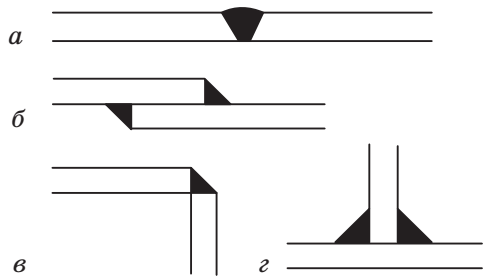


Рис. 12.12. Виды сварных соединений:
а — стыковые; *б* — внахлестку; *в* — угловые; *г* — тавровые

■ *сварка давлением*, когда металл доводят до пластичного состояния и сдавливают;

■ *сварка плавлением*, при которой металл нагревают выше температуры плавления, после чего сваривают без применения механического воздействия.

Высокий местный нагрев при сварке вызывает значительное изменение в структуре металла. Чем меньше околошовная зона термического воздействия, тем выше свойства сварного шва.

В зависимости от источника нагрева различают электрическую и химическую сварку.

Электрическая сварка. Эта сварка основана на использовании тепла, выделяемого при прохождении электрического тока. Электрическая сварка подразделяется:

■ на сварку сопротивления (или контактную), при которой электрический ток выделяет тепло за счет омического сопротивления (в контактах свариваемых деталей);

■ электродуговую, основанную на использовании при сварке тепла, выделяемого электрической дугой.

При сварке методом сопротивления электрический ток подводится к двум свариваемым изделиям. При их контакте выделяется тепло, которое размягчает металл, и под нагрузкой они свариваются. Применяются три вида контактной сварки: точечная, роликовая и стыковая.

Точечная сварка служит для соединения внахлестку сеток и каркасов. Суммарная толщина свариваемых таким способом изделий не должна превышать 20 мм.

Роликовая сварка используется для соединения листового металла.

Стыковая сварка применяется для соединения металлических стержней арматуры.

Источником тепла при ***электродуговой сварке*** (рис. 12.13) является электрическая дуга, открытая в 1902 г. профессором В.В. Петровым. При этом температура, развивающаяся в центре столба дуги, достигает 6000 °С.

Практическое применение электрической дуги для сварки металлов было осуществлено русскими инженерами Н.Н. Бенардосом и Н.Г. Славяновым.

По *способу Бенардоса* (рис. 12.13, *а*) электрическая дуга возбуждается в атмосфере между угольным электродом и сва-

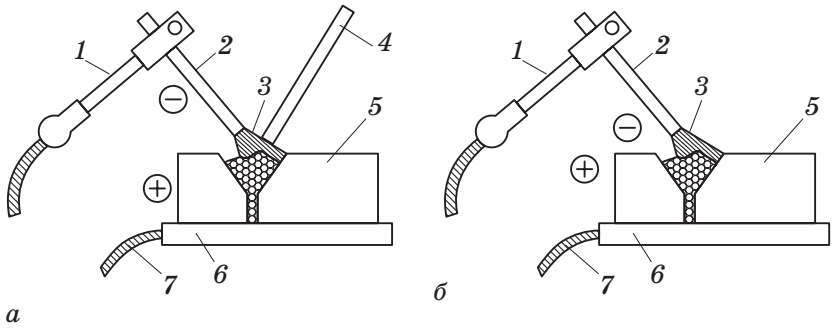


Рис. 12.13. Схема дуговой электросварки:
а — способ Н.Н. Бенардоса; *б* — способ Н.Г. Славянова; *1* — держатель; *2* — электрод; *3* — электрическая дуга; *4* — присадочный материал; *5* — свариваемая деталь; *6* — плита; *7* — гибкий провод

риваемой деталью. При этом способе пользуются постоянным током. Положительный полюс присоединяют к свариваемому изделию, отрицательный — к угольному электроду. Присадочный материал вводят отдельно. Этот способ сварки широко применяется при сварке цветных металлов.

Способ Славянова(рис. 12.13, *б*) — основной вид сварки, применяемый для соединения элементов металлических строительных конструкций. При контакте изделия и металлического электрода между ними возникает электрическая дуга с температурой выше 5000 °С. При этой температуре металл электрода переходит в мелкокапельное жидкое состояние и переносится на свариваемое изделие. Металл изделия также расплавляется на некоторую глубину, которая называется ***глубиной провара***, образуя с наплавленным металлом однородный сплав, в результате чего соединение приобретает высокую прочность.

Несмотря на большую распространенность, электродуговая сварка имеет ряд существенных недостатков:

- малая скорость сварки за счет большой зоны разогрева металла, что вызывает коробление изделия;
- пористость шва и выгорание легирующих компонентов из сплавов во время окислительных процессов;
- затруднение сварки металлов с различными физико-механическими свойствами.

Для устранения отмеченных недостатков в последние годы применяется химическая сварка в среде защитных газов или под флюсом.

Химическая сварка. Эта сварка производится за счет тепла химических реакций и делится на ***газовую*** и ***термитную***.

При ***газовой сварке*** тепловым источником служат продукты сгорания смеси кислорода с горючим газом или жидким распыленным топливом. В настоящее время применяются следующие горючие газы: ацетилен, водород, нефтегаз, природный газ, а также пары бензина, бензола, керосина и др.

Ацетилено-кислородная сварка наиболее экономична и эффективна. Ацетилен C_2H_2 — бесцветный газ с плотностью 906 кг/м^3, который получают путем воздействия воды на карбид кальция $CaC_2 + 2H_2O \rightarrow C_2H_2 + Ca(OH)_2$.

При давлении 17,5 МПа и выше ацетилен взрывоопасен.

При полном сгорании ацетилена в кислороде образуется пламя с температурой около 3200 °С.

Для сварки используются специальные сварочные головки, в которых ацетилен смешивается с кислородом (рис. 12.14) и сгорает у выхода из горелки. Процесс сварки осуществляется наплавлением присадочного металла на нагретый ацетилено-кислородным пламенем шов.

Присадочным материалом при газовой сварке служит стальная проволока диаметром 2...8 мм с содержанием углерода от 0,15 до 1,5 % в зависимости от состава свариваемого металла. Для уменьшения степени окисления шва во время сварки применяют флюсы (буру и борную кислоту).

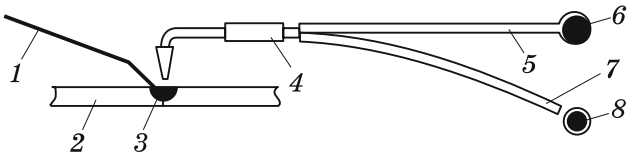


Рис. 12.14. Схема газовой сварки:
1 — присадочный материал; *2* — свариваемый материал; *3* — наплавленный металл; *4* — корпус горелки; *5*, *7* — шланги для подачи ацетилена и кислорода; *6* — баллон с кислородом; *8* — ацетиленовый генератор

Газовую сварку обычно применяют для изделий толщиной не более 30 мм. При большей толщине свариваемого изделия целесообразно применять электродуговую сварку.

Термитная сварка. Термит — смесь алюминиевого порошка (22 %) и оксидов железа Fe_2O_3 или Fe_3O_4 (78 %). Смесь предварительно тщательно перемешивают и подогревают до температуры около 1300 °С. После этого смесь вступает в реакцию и начинает выделять тепло при температуре 3000 °С:

$$2Al + Fe_2O_3 \rightarrow 2Fe + Al_2O_3 + Q.$$

Термитную сварку применяют для сварки труб, рельсов, при ремонтных работах. Наибольшее распространение термитная сварка получила на железнодорожном транспорте при сварке рельсов и труб.

Резка металлов. В строительстве широко применяется газовая резка металла. Наиболее распространена ***ацетилено-кислородная резка*** металлов (рис. 12.15).

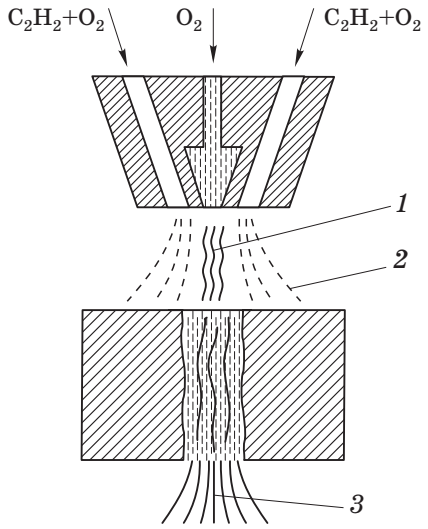


Рис. 12.15. Схема ацетилено-кислородной резки:
1 — режущий кислород; *2* — нагревательное пламя;
3 — выдуваемая окалина

Процесс резки распадается на три этапа:

1) подогрев стали до температуры воспламенения (≈1250 °С) смесью ацетилена и кислорода ($C_2H_2 + O_2$);

2) **сжигание подогретого участка стали подводимой струей** чистого кислорода (O_2).

3) выдувание струей кислорода оксидов, образовавшихся в разрезе.

12.8. Коррозия металлов и методы их защиты

Коррозия металлов представляет собой их разрушение под влиянием различных химических реагентов среды, в которой они находятся. В месте разрушения металла коррозией образуется рыхлый продукт — гидрат оксида железа $Fe(OH)_3$, который называют ***ржавчиной***. Коррозия наиболее опасна во влажной атмосфере и в водных растворах электролитов.

Очень чистые металлы с трудом поддаются коррозии и медленно растворяются в кислотах. Двухфазные сплавы корродируют гораздо быстрее однофазных. Многие металлы сами по себе хорошо сопротивляются коррозии, но очень быстро корродируют при контакте с другими металлами. Так, например, чистое железо в контакте с медью очень часто разрушается. Возможен и противоположный вариант: например, контакт железа с цинком защищает железо от коррозии. Следует отметить, что из двух металлов, находящихся в контакте, один всегда защищается другим.

Коррозия быстрее развивается по напряженным местам металлических изделий, и всякое механическое повреждение поверхности вызывает ее усиление. Коррозия может быть представлена как электрохимический процесс. Согласно этой теории, взаимодействие двух различных металлов в электролите устанавливается по электрохимическому ряду напряжений, приведенному в табл. 12.2.

Таблица 12.2

Электрохимический ряд напряжений различных металлов

Элемент	Нормальный потенциал по отношению к водороду	Элемент	Нормальный потенциал по отношению к водороду
Cu	+0,34	Cd	−0,40
Sb	+0,20	Fe	−0,44
H_2	0,00	Cr	−0,51
Pb	−0,13	Zn	−0,76
Sn	−0,14	Mn	−1,10
Ni	−0,23	Al	−1,30
Co	−0,27	Mg	−1,55

В металлических сплавах, состоящих из различных фаз, между последними возникают гальванические токи. В результате разрушается более электроотрицательная фаза. Например, если взять железо и цинк, то цинк по отношению к железу имеет более отрицательный потенциал и будет разрушаться, предохраняя железо от ржавления.

Защита металла от коррозии. В настоящее время применяются следующие способы защиты металлов от коррозии.

Защита легированием — введение в металл легирующих элементов, повышающих сопротивление сплава коррозии (например, никеля и хрома в нержавеющие кислотоупорные стали, меди — в строительные стали). Существует много разновидностей стали с различным содержанием Ni, Mo, Cu и Ti, обладающих повышенной стойкостью в агрессивных средах.

Защита оксидными пленками — оксидирование и фосфатирование, которые производятся путем кипячения изделий в специальных составах (селитры, едкого натра и перекиси марганца или фосфорной кислоты и ее железных и марганцевых солей). Образующиеся пленки темного цвета обладают хорошей коррозионной устойчивостью.

Защита металла покрытием пленкой из другого металла имеет следующие разновидности:

- *катодное покрытие* — покрытие металлом, который является более электроположительным (менее активным), чем

основной металл изделия (в этом случае пленка является только механической защитой);

■ *анодное покрытие* — покрытие основного металла металлом с более отрицательным электродным потенциалом. В этом случае пленка является электрохимической защитой.

Защита лакокрасочными и полимерными покрытиями. Наиболее простым и распространенным методом защиты металлических конструкций от коррозии является покрытие их слоем лака или краски. В последнее время для защиты металлов от коррозии широкое применение получили методы нанесения полимерных пленок. Для этих целей используют большое количество смешанных составов на основе поливинилхлоридных, полиуретановых, фенолоформальдегидных, каучуковых, эпоксидных, а также кремнийорганических соединений. За рубежом применяют нанесение защитных пленок на прокатные строительные профили.

При нанесении защитных покрытий необходимо предварительно подготовить поверхность (очистить от продуктов коррозии). Для этого применяют *механические* (пескоструйные, щеточные, водоструйные и термические аппараты) и *химические* (обезжиривание, травление, кислотная очистка, фосфатирование) методы очистки.

К химическим методам относится использование модификаторов ржавчины, основанных на применении ортофосфорной кислоты (H_3PO_4), реже щавелевой, винной, которые при взаимодействии с продуктами коррозии образуют труднорастворимые комплексные соединения. В состав модификатора вводят ингибиторы (замедлители) коррозии на основе лигнина (он связывает ионы железа и его оксидные формы и задерживает коррозию, особенно в кислых средах), а также четвертичные аммониевые соединения и другие органические соединения, которые, адсорбируясь на поверхности металла, тормозят коррозию.

При изготовлении железобетонных конструкций в зависимости от вида бетона и вяжущего необходимо предусматривать определенные методы защиты от коррозии арматуры и закладных деталей. Гипсовые и другие серосодержащие вяжущие вызывают коррозию арматуры и практически для

изготовления железобетонных изделий не применяются. Для характеристики агрессивности сред по отношению к бетонам принято определять концентрацию водородных ионов, т.е. pH. В *кислых средах* с pH < 4,3 коррозия идет очень быстро. В *слабокислых* и *слабоосновных средах* с pH от 4,4 до 10 скорость коррозии меньше и почти не зависит от pH. В *щелочных растворах* с pH > 10 коррозия протекает медленно и она зависит от pH. Так, при pH 12 коррозия в два раза меньше, чем при pH 10.

Проведенные многочисленные исследования показывают, что pH поровой жидкости портландцемента составляет 11,25...11,80, шлакопортландцемента — 10,4...10,8. Таким образом, pH поровой жидкости портландцемента не вызывает коррозии и плотный бетон является хорошей защитой арматуры от коррозии. Однако арматура в легких и пористых бетонах при работе во влажных и агрессивных средах требует антикоррозионной защиты.

Для защиты арматуры от коррозии ее покрывают защитными пленками: цементно-казеиновыми обмазками, жидким стеклом, керамическими эмалями. Для защиты более ответственных элементов, закладных деталей применяют цинкование. К органическим защитным пленкам относятся битумные, битумоцементные и другие покрытия на основе искусственных полимеров, смол, латексов (например, цементно-поливинилацетатная, цементно-полистирольная и др.).

Основными методами нанесения антикоррозионного покрытия являются окунание, полив, обрызгивание. В последнее время предложен метод окраски в электрическом поле, в котором частицы покрытия ионизируются и притягиваются к отдельному электроду — арматуре.

Методы оценки коррозии металлов. Существуют качественные и количественные методы оценки коррозии.

Качественная оценка — визуальный контроль характера продуктов коррозии, прочности их сцепления с металлом.

Количественная оценка выражается в оценке *скорости коррозии* V_m (весовой показатель), которая может быть выражена через потерю массы Δm единицей поверхности (S) за единицу времени (τ):

$$V_m = \frac{\Delta m}{S\tau},\ \text{мг/(см}^2\cdot\text{сут)},\ \text{г/(см}^2\cdot\text{ч)}. \qquad (12.2)$$

Более удобным показателем оценки коррозии, учитывающим плотность материала, является *глубинный показатель* П:

$$\text{П} = \frac{V_m}{\rho},\ \text{см/ч}, \qquad (12.3)$$

где ρ — плотность металла, г/см^3.

Для стали П ≈ 8,76 мм/год.

12.9. Цветные металлы и сплавы

В промышленности и строительстве широко применяют цветные металлы и сплавы, которые обладают рядом особых свойств: пластичностью, высокой электро- и теплопроводностью, антикоррозионной стойкостью, малой плотностью.

К *редким металлам* относят вольфрам, молибден, ванадий, ниобий, цирконий. Все они имеют температуру плавления выше 1700 °С и применяются в качестве специальных добавок при производстве стали. К редким радиоактивным металлам относят уран, торий, актиний, протактиний. В связи с развитием атомной энергетики применение их резко возросло.

В строительстве из цветных металлов наиболее широко применяют сплавы алюминия и меди.

12.9.1. Алюминий и его сплавы

Алюминий — легкий серебристо-белый металл. Важным его достоинством является низкая плотность (2700 кг/м^3). В чистом виде мягок, пластичен, хорошо отливается, прокатывается, температура плавления составляет 657 °С. Алюминий обладает повышенной стойкостью к коррозии на воздухе за счет образования защитной пленки (Al_2O_3), имеет высокую тепло- и электропроводность. Предел прочности алюминия на растяжение 90...120 МПа, относительное удлинение — 20...30 %,

твердость НВ = 25...30, коэффициент теплопроводности — 200 Вт/м · °С).

В чистом виде в строительстве алюминий применяется для отливки деталей, изготовления порошков (алюминиевые краски и газообразователи при изготовлении ячеистых бетонов), фольги, электропроводов. Из алюминиевой фольги делают высокоэффективный утеплитель (***альфоль***), ее используют в качестве отражателя тепловых лучей, а также декоративного материала.

В связи с открытием нового способа выплавки алюминия непосредственно из руды значительно снизилась стоимость производства алюминиевых сплавов и изделий из них.

Алюминиевые сплавы рекомендуется использовать:

- для несущих конструкций зданий и сооружений (оболочки, рамы, фермы и т.д.), конструкций для химических предприятий с агрессивной средой (кроме воздействия влажной и щелочной среды, растворов серной кислоты и ее солей), опор линий электропередачи;
- ограждающих конструкций, кровельных панелей, подвесных потолков, витрин, переплетов и т.д.

Элементы конструкций из алюминиевых сплавов можно соединять заклепками, болтами, сваркой. Сварные соединения выполняются механизированной или ручной электродуговой сваркой в защитной среде аргона, электрической контактной сваркой, сваркой под слоем флюса и газовой сваркой.

Для строительных изделий алюминий применяют также в виде сплавов, в состав которых входят Cu, Mn, Mg, Si, Fe.

Сплав, состоящий из алюминия, меди, магния, марганца, носит название ***дюралюминий*** (дюраль, дуралюмин). Сплавы алюминия имеют предел прочности при растяжении более 100 МПа. Из них изготовляют плоские и волнистые листы, прокатные, гнутые, клепаные и сварные профили, трубы. Конструкции и изделия из таких сплавов весьма эффективны для устройства оконных коробок и переплетов, дверей и дверных коробок, наружной облицовки зданий и для изготовления легких трехслойных панелей с пенопластовым утеплителем.

12.9.2. Медь и ее сплавы

Медь — металл красного цвета плотностью 8800 кг/м^3, температура плавления — 1083 °С, предел прочности на растяжение — около 200 МПа, относительное удлинение — 30...60 %. Это мягкий и пластичный металл, хорошо проводит электричество и теплоту. Его применяют для изготовления электрических проводов и в качестве составной части различных сплавов.

Сплав, состоящий из меди и цинка (до 50 %), называют ***латунью***. Она обладает высокими механическими и антикоррозийными свойствами и поддается горячей и холодной обработке. Иногда к сплаву латуни добавляют свинец, олово, алюминий, кремний и др.(в сумме до 10 %).

Сплав меди с оловом (до 10 %) называют ***оловянистой бронзой***. Сплавы меди с алюминием, никелем, кремнием носят название ***безоловянистых бронз***. Бронзу применяют в виде изделий для внутреннего оборудования зданий (сантехническая арматура, вентиляционные решетки, детали карнизов, фурнитура и др.).

Кроме бронз и латуни, известны другие сплавы, содержащие медь: ***мельхиор*** (20 % никеля и 80 % меди), ***никелин*** (45 % никеля и 55 % меди), ***константан*** (40 % никеля, 59 % меди и 1 % марганца).

12.9.3. Цинк

Цинк — пластичный серебристо-белый металл, который получают из сульфидных цинковых руд ZnS. Плотность цинка — 7000 кг/м^3, температура плавления — 420 °С, пластичен при 100...150 °С. Цинк применяют для оцинковки стальных изделий (гвоздей, болтов, кровельной стали, стальных ограждений на дорогах), а также в качестве компонента сплавов.

12.9.4. Титан и его сплавы

Титан — относительно легкий металл (его плотность равна 4500 кг/м^3), по прочности близкий к железу ($\sigma_в$ = 250 МПа). Особенностью титана является хорошая коррозионная стойкость.

В сплавах на основе титана может быть достигнут высокий уровень прочностных характеристик (до 1000...1200 МПа). Малая плотность и значительная прочность этих сплавов обусловили их широкое применение в авиационной и космической технике.

Одно из важных преимуществ титана — он не становится хрупким при низких температурах. В настоящее время разработан ряд сплавов на основе титана, предназначенных для конструкций, работающих в районах Заполярья и Крайнего Севера.

Титан и его сплавы пока еще мало применяются в строительстве. Это связано с трудоемкостью и техническими сложностями получения титана из руд и его дальнейшей обработки, что обусловливает его довольно высокую стоимость.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Охарактеризуйте свойства и структуру металлов.
2. Как производят чугун?
3. Что такое сталь? Как ее производят?
4. Какие стали называются легированными?
5. Назовите прокатные профили стали.
6. Как происходит обработка металлов давлением?
7. Охарактеризуйте сварку и резку металлов.
8. Какие процессы происходят при коррозии стали? Какие методы защиты применяются?
9. Назовите основные цветные металлы, их сплавы и характерные свойства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наука о материалах (материаловедение) — один из решающих факторов научно-технического прогресса во всех отраслях хозяйства, в том числе в дорожно-транспортном комплексе.

Основными направлениями развития строительного материаловедения являются теория структурообразования и технология композиционных материалов на основе использования фундаментальных наук, в первую очередь коллоидной химии и физико-химической механики. Их цель — повышение качества материалов и сокращение энергозатрат на их производство.

Особую роль в строительном материаловедении XXI в. играют композиционные строительные материалы. Это материалы, которые состоят из двух основных компонентов:

- матрицы, непрерывно распределенной по всему объему материала;
- компонента, упрочняющего матрицу в виде дисперсных волокон или твердых частиц.

При этом свойства нового композиционного материала гораздо лучше, чем свойства исходных компонентов.

В зависимости от свойств материала матрицы, строительные композиционные материалы можно разделить на следующие группы:

- композиции с неорганической матрицей, например цементной, силикатной, керамической (минеральные вяжущие);
- с органической, например битумной, полимерной матрицей;
- с металлической матрицей (металлические сплавы).

В композиционных строительных материалах роль матрицы огромна: она объединяет в единое целое частицы заполнителя (зерна, дисперсные волокнистые частицы), придает монолитность и форму изделию, а также обеспечивает передачу внешних усилий на структуру материала, предохраняет ее от механических и коррозионных воздействий.

В настоящее время, согласно И.М. Грушко и И.В. Королеву, структура композиционных материалов может быть рассмо-

трена на основе трех видов моделей: с зернистым, волокнистым и газонаполненным (ячеистые, пористые материалы) наполнителями.

Модель с зернистым наполнителем описывает бетоны, растворы и другие материалы конгломератного строения. С увеличением содержания наполнителя механические свойства смеси улучшаются: для цементобетонов прочность повышается на 20...30 %, для асфальтобетонов — на 50...80 %.

Модель с волокнистым наполнителем описывает асбестоцементные изделия, стеклопластики, древесно-волокнистые материалы и др. Волокнистый наполнитель наиболее активно влияет на механические свойства, в особенности на прочность при растяжении: при ориентированных волокнах — изотропно, при хаотически распределенных волокнах — анизотропно.

Модель с газонаполненными ячейками описывает многие теплоизоляционные и акустические материалы (пористое стекло, ячеистый бетон, пористые полимерные материалы и другие материалы ячеистой структуры). Газонаполненные материалы характеризуются малой плотностью и соответственно малым коэффициентом теплопроводности.

В развитии строительного материаловедения важнейшее место занимает разработка новых эффективных инновационных технологий, сокращающих трудовые, энергетические и материальные затраты, возникающие во время их производства и эксплуатации.

В рамках перспективного развития дорожно-строительного материаловедения сформулированы основные задачи в этом направлении:

- организация широкого производства щебня кубовидной формы узких фракций для устройства защитных слоев, тонкослойных асфальтобетонных и бетонных покрытий, бетонных конструкций мостовых сооружений;
- разработка промышленных реагентных и нереагентных методов и технологических устройств для активации компонентов асфальто- и цементобетонов (песков, минеральных порошков, цементов, битумов, битумных эмульсий), позволяющих резко повысить сроки службы дорожных сооружений,

снизить энергоемкость их строительства и эксплуатации, а также стоимость этих объектов (особенно при широком применении местного сырья и техногенных отходов производства);

- совершенствование работы производственных предприятий дорожной отрасли (АБЗ, ЦБЗ, полигоны, битумные и эмульсионные базы, камнедробильные заводы и др.), включающее изготовление капсулированных битумов и гранулированных асфальтовяжущих веществ, позволяющее производить динамическое регулирование всех технологических параметров на основе полной автоматизации всех операций и процессов при минимизации энергопотребления. Для выполнения этой задачи должна быть разработана система энергетического аудита на всех производственных предприятиях, изготавливающих дорожно-строительные материалы и изделия;
- разработка получения составов и технологии применения модифицированных полимерных композиций для защиты от коррозии бетонных дорожных и мостовых конструкций.

В современном материаловедении все большее распространение получает использование ультразвуковых, магнитных и электромагнитных полей, позволяющих разработать и применять эффективные технологии на основе известных физических эффектов (электрогидравлического, трибоэлектрического, механохимического и др.). Например, пески могут направленно менять поверхностный отрицательный заряд на положительный или наоборот, что в корне меняет процесс их адгезионного взаимодействия с органическими вяжущими в контактных слоях.

Важное значение имеет *принцип соответствия*, согласно которому методы воздействия на материалы, методы их переработки должны соответствовать характеру исходного сырья, основным закономерностям структурообразования, протекающим в материалах.

При этом режимы перемешивания и уплотнения, формирования структуры материалов должны соответствовать их природе и другим условиям, обеспечивающим получение ма-

териалов с оптимальным сочетанием свойств (согласно закону створа Рыбьева, эффекту Ребиндера и др.).

Новые современные технологии должны быть безотходными или малоотходными, что вызвано требованиями охраны окружающей среды.

При добыче и переработке минеральных полезных ископаемых, а также в промышленности и строительстве образуются многотоннажные техногенные побочные продукты: дефекат, шлаки, золы, отработанные формовочные пески, фосфогипс, кислый гудрон, мазутные очистки, гидролизный лигнин, таловый пек и др. К техногенным материалам также относится вторичное сырье (изношенные автомобильные покрышки, вышедшие из употребления пластмассовые и полимерные материалы, старый асфальто- и цементобетон, морально устаревшие бетонные и железобетонные конструкции, битый кирпич, бой стекла).

Обычно указанные выше материалы характеризуются большой неоднородностью. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо производить оценку качества побочных продуктов промышленности и выбирать научно обоснованный способ их «облагораживания», а также конструкцию для их применения, чтобы потенциальные возможности модифицированного побочного продукта были полностью использованы.

Отходы промышленности занимают огромные территории при их захоронении и требуют значительных затрат на содержание отвалов. Поэтому охрана окружающей среды заключается в освобождении территории от свалок и отстойников путем ее рекультивации и приведения в состояние, пригодное для сельскохозяйственных нужд. Наряду с этим, велика экологическая роль промышленности строительных материалов, способной использовать повторно миллиарды тонн выбрасываемого минерального сырья.

Особенно материалоемко дорожное строительство. На один километр дороги расходуются десятки тысяч тонн дорожно-строительных материалов, которые могут быть получены из отходов металлургической, химической промышленности и др.

Чтобы решить эту проблему, необходимо участие на кооперативных началах производителей отходов (металлургия, энергетика и др.) и их потребителей — промышленность строительных материалов. Такой подход позволяет организовать эффективное безотходное производство, исключающее загрязнение окружающей среды.

Современные технологии строительных материалов максимально механизируют и автоматизируют, при этом особое внимание уделяют оптимизации технологических процессов на основе использования ЭВМ.

Список рекомендуемой литературы

Автомобильные дороги Беларуси: энциклопедия / под общ. ред. А.В. Минина. Минск: БелЭн, 2002.

Веренько В.А. Новые материалы в дорожном строительстве: учеб. пособие / В.А. Веренько. Минск: Технопринт, 2004.

Горелышев Н.В. Асфальтобетон и другие битумоминеральные материалы: учеб. пособие / Н.В. Горелышев. М.: Терра, 1995.

Давыдов В.Н. Изготовление изделий из асфальтобетонных смесей: учеб. пособие для вузов / В.Н. Давыдов. М.: Изд. Ассоциации строит. вузов, 2003.

Дорожно-строительные материалы: учебник для вузов / И.М. Грушко [и др.]. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1991.

Ицкович С.М. Технология заполнителей бетона: учебник для вузов / С.М. Ицкович, Л.Д. Чумаков, Ю.М. Баженов. М.: Высш. шк., 1991.

Ковалев Я.Н. Активационные технологии дорожных композиционных материалов / Я.Н. Ковалев. Минск: БелЭн, 2002.

Ковалев Я.Н. Физико-химические основы технологии строительных материалов / Я.Н. Ковалев. Минск. : Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2012.

Королев И.В. Пути экономии битума в дорожном строительстве / И.В. Королев. М.: Транспорт, 1986.

Леонович И.И. Дорожно-строительные материалы: учебник для вузов / И.И. Леонович, К.Ф. Шумчик. Минск: Вышэйш. шк., 1983.

Платонов А.П. Полимерные материалы в дорожном и аэродромном строительстве / А.П. Платонов. М.: Транспорт, 1994.

Рыбьев И.А. Основы строительного материаловедения в лекционном изложении: учеб. пособие для вузов / И.А. Рыбьев. М.: Астрель, 2006.

Строительное материаловедение: учеб. пособие для вузов / В.А. Невский [и др.]; под ред. В.А. Невского. Ростов н/Д: Феникс, 2009.

Шейкин А.Е. Строительные материалы: учебник для вузов / А.Е. Шейкин. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1978.

Юхневский П.И. Строительные материалы и изделия: учеб. пособие для вузов / П.И. Юхневский, Г.Т. Широкий. Минск: Технопринт, 2004.

По вопросам приобретения книг обращайтесь:

Республика Беларусь

ООО «Новое знание»
220050, а/я 79, Минск,
пр. Пушкина, д. 15а
Тел./факс: (10-375-17) 211-50-38
E-mail: nk@wnk.biz
http:// wnk.biz

Российская Федерация

Отдел оптовых продаж «ИНФРА-М»:
127282, Москва, ул. Полярная, д. 31в, стр. 1
Тел. (495) 380-4260; факс (495) 363-9212
E-mail: books@infra-m.ru

Отдел «Книга–почтой»:
Тел. (495) 363-4260 (доб. 232, 246)

Учебное издание

Высшее образование

Ковалев Ярослав Никитич
Кравченко Сергей Егорович
Шумчик Виктор Касперович

ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Учебно-методическое пособие

Ведущий редактор	С.В. Исаенко
Редактор	Н.В. Рощина
Художник обложки	С.В. Ковалевский
Компьютерная верстка	Н.А. Петрова
Корректор	К.А. Степанова

Оригинал-макет подготовлен ООО «Новое знание»

Подписано в печать 25.09.2012. Формат 60×90 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Петербург. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 40,0. Уч.-изд. л. 30,97. Тираж 1000 экз.

ТК 430300-11983-250912

Общество с ограниченной ответственностью «Новое знание».
ЛИ № 02330/0552555 от 08.04.2009.
Пр-т Пушкина, 15, комн. 16, Минск, Республика Беларусь.
Почтовый адрес: а/я 79, 220050, Минск, Республика Беларусь.
Телефон/факс: (10-375-17) 211-50-38
E-mail: nk@wnk.biz http://wnk.biz

ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М»
127282, Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1
Тел.: (495) 380-05-40, 380-05-43. Факс: (495) 363-92-12
E-mail: books@infra-m.ru http://www.infra-m.ru