

**Свойства и поведение  
строительных материалов  
в условиях пожара**

**Москва  
2016**

Министерство Российской Федерации  
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий

Академия Государственной противопожарной службы

## Свойства и поведение строительных материалов в условиях пожара

Учебное пособие

Допущено Министерством Российской Федерации  
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий в качестве  
учебного пособия для высших образовательных учреждений  
МЧС России

Москва  
2016

УДК 699.8:614.841.33(075.8)

ББК 38.96

С 25

Авторы:

Б. Ж. Битуев, В. М. Ройтман, Б. Б. Серков,  
А. Б. Сивенков, С. В. Стебунов

Рецензенты:

*А. В. Попов*, заместитель начальника отдела Департамента надзорной деятельности МЧС России;

*С. Н. Терехин*, начальник кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения Санкт-Петербургского университета МЧС России, кандидат технических наук, доцент

**Свойства и поведение строительных материалов в условиях  
С 25 пожара : учеб. пособие / Б. Ж. Битуев, В. М. Ройтман, Б. Б. Серков  
и др. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2016. – 148 с.**

ISBN 978-5-9229-0123-9

В учебном пособии изложены основные сведения о строительных материалах и их поведении в условиях пожара, приведены методы исследования и оценки поведения строительных материалов в условиях пожара, способы их огнезащиты и пути совершенствования нормирования пожаробезопасности применения материалов в строительстве.

Учебное пособие предназначено для высших учебных заведений пожарно-технического профиля МЧС России и может быть полезно нормативно-техническим работникам Государственной противопожарной службы МЧС России, проектировщикам, а также студентам вузов строительного профиля.

УДК 699.8:614.841.33(075.8)

ББК 38.96

ISBN 978-5-9229-0123-9

© Академия Государственной противопожарной  
службы МЧС России, 2016

## Введение

В нашей стране строятся здания и сооружения различного назначения. Инвесторами строительства являются не только государственные структуры, но и разнообразные фирмы и ассоциации, а также физические лица. Наряду с обычными жилыми домами, дачными коттеджами, гаражами, магазинами, производственными и другими зданиями возводятся уникальные строения, не имеющие аналогов ни в российской, ни в мировой практике. Достаточно привести примеры четырехэтажного подземного торгового комплекса на Манежной площади в Москве, высотных зданий нового общественного центра «Москва-Сити», тоннельных развязок длиной до 3 км, Третьего транспортного кольца в Москве, Ледового дворца в Ярославле, триумфальной арки в Курске, нефтепирса в Махачкале, объектов Каспийского трубопроводного консорциума.

В строительных конструкциях зданий и сооружений используются различные по происхождению и пожарной опасности материалы. Конструктивные элементы из железобетона, кирпича, бетона способны в условиях пожара в течение десятков минут, а иногда даже нескольких часов сопротивляться огневому воздействию и не разрушаться. Стальные конструкции зданий при пожаре не горят, не распространяют огонь, но при 15–20-минутном огневом воздействии теряют несущую способность. Несколько дольше при горении продолжают выполнять несущие функции массивные деревянные конструкции, однако они способствуют распространению огня и развитию пожара. Конструктивные элементы из пластмасс, а также отделочные, теплоизоляционные, кровельные и другие материалы в условиях пожара, как правило, не только горят, но и выделяют опасные для человеческого организма токсичные продукты.

Знать пожарные свойства строительных материалов, оценивать поведение конструкций при пожаре, предлагать эффективные способы огнезащиты конструктивных элементов обязан инженер-проектировщик, инженер-строитель, инженер-эксплуатационник. Но в первую очередь это обязанность инженера пожарной безопасности. Одной из базовых дисциплин для становления инженера пожарной безопасности является дисциплина «Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре». Настоящее учебное пособие содержит материал для изучения первого раздела дисциплины.

Необходимость издания учебного пособия обусловливается введением в действие Федерального закона Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», а также перечня национальных стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения Федерального закона.

В методическом отношении учебное пособие построено в соответствии с многолетним опытом преподавания дисциплины «Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре» на кафедре пожарной безопасности в строительстве Академии ГПС МЧС России.

В учебном пособии изложены основные сведения о строительных материалах и их пожарной опасности, приведены методы испытания материалов на горючесть, воспламеняемость, токсичность продуктов горения, дымообразующую способность, распространение пламени по поверхности, описаны способы и эффективность огнезащиты стройматериалов, намечены пути совершенствования нормирования пожаробезопасности применения материалов в строительстве.

Авторы выражают благодарность рецензентам учебного пособия и профессорско-преподавательскому составу кафедры пожарной безопасности в строительстве за ценные замечания и пожелания, сделанные при подготовке рукописи учебного пособия, а также адъюнкту кафедры пожарной безопасности в строительстве Нигматуллиной Динаре Матафуровне за оказанную помощь в подготовке учебного пособия к изданию.

## 1. Основные свойства строительных материалов и процессы, происходящие в них в условиях пожара

### 1.1. Внешние и внутренние факторы, определяющие поведение строительных материалов в условиях пожара

Номенклатура строительных материалов содержит сотни названий. Каждый материал в определенной мере отличается от других внешним видом, химическим составом, структурой, свойствами, областью применения в строительстве и поведением в условиях пожара. Вместе с тем между материалами не только существуют различия, но и множество общих признаков. Под *поведением строительных материалов* в условиях пожара понимается комплекс физико-химических превращений, приводящих к изменению состояния и свойств материалов под влиянием интенсивного высокотемпературного нагрева.

На рис. 1.1 показана обобщенная схема, в которой перечислены основные факторы, процессы и последствия, характеризующие поведение различных материалов в условиях пожара.

Для того чтобы понять, какие изменения происходят в структуре материала, как меняются его свойства, т. е. как влияют внутренние факторы на поведение материала в условиях пожара, необходимо хорошо знать сам материал: его происхождение, сущность технологии изготовления, состав, начальную структуру и свойства.

В процессе эксплуатации материала в обычных условиях на него воздействуют внешние эксплуатационные факторы (см. рис. 1.1):

- область применения (для облицовки пола, потолка, стен; внутри помещения с нормальной средой, с агрессивной средой, снаружи помещения и т. п.);
- влажность воздуха (чем она выше, тем выше влажность пористого материала);
- различные нагрузки (чем они выше, тем тяжелее материалу сопротивляться их воздействию);
- природные воздействия (солнечная радиация, температура воздуха, ветер, атмосферные осадки и т. п.).

Перечисленные внешние факторы влияют на долговечность материала (ухудшение его свойств в течение времени нормальной эксплуатации). Чем они агрессивнее (интенсивнее) воздействуют на материал, тем быстрее изменяются его свойства, разрушается структура.

При пожаре, помимо перечисленных, на материал воздействуют и значительно более агрессивные факторы:

- высокая температура окружающей среды;
- время (продолжительность) нахождения материала под воздействием высокой температуры;

- воздействие огнетушащих веществ;
- воздействие агрессивной среды.



Рис. 1.1. Структурная схема-ключ к изучению, оценке, прогнозированию и регулированию поведения строительных материалов в условиях пожара и определению области их безопасного применения

В результате воздействия на материал внешних факторов пожара в материале могут протекать те или иные негативные процессы (в зависимости

от вида материала, его структуры, состояния в период эксплуатации). Прогрессирующее развитие негативных процессов в материале ведет к отрицательным последствиям (см. рис. 1.1).

## 1.2. Основные свойства, характеризующие поведение строительных материалов в условиях пожара

*Свойствами* называют [1] способность материалов реагировать на воздействие внешних и внутренних факторов: силовых, влажностных, температурных и др.

Все свойства материалов взаимосвязаны. Они зависят от вида, состава, строения материала. Ряд из них оказывает более существенное, другие – менее существенное влияние на пожарную опасность и поведение материалов в условиях пожара.

Для изучения и объяснения характера поведения строительных материалов в условиях пожара предлагается в качестве основных рассмотреть следующие свойства:

1. Физические свойства: объемная масса, плотность, пористость, гигроскопичность, водопоглощение, водопоглощаемость, паро- и газопроницаемость.
2. Механические свойства: прочность, деформативность.
3. Теплофизические свойства: теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность, тепловое расширение, теплостойкость.
4. Свойства, характеризующие пожарную опасность материалов: горючесть, тепловыделение, дымообразование, выделение токсичных продуктов горения.

Свойства материалов обычно характеризуют соответствующими числовыми показателями, которые определяют с помощью экспериментальных методов и средств.

### 1.2.1. Физические свойства

К физическим относят свойства, выражающие способность материалов реагировать на воздействие физических факторов: гравитационных, влажностных и др.

Рассмотрим образец пористого материала (рис. 1.2). Обозначим его массу –  $m$ , объем –  $V$ . Учитывая, что материал пористый, часть объема образца занимают поры. Обозначим эту часть объема  $V_p$ . Причем поры бывают открытыми – сообщающимися между собой и атмосферой. Обозначим часть объема образца, занятую указанными порами,  $V_{оп}$  и  $V_{зоп}$  соответственно. Остальную часть объема образца занимает материал (вещество в абсолютно плотном состоянии) –  $V_a$  (см. рис. 1.2).

*Средняя плотность* (объемная масса)  $\rho_0$ , кг/м<sup>3</sup>, – масса единицы объема материала в естественном состоянии, вычисляют по формуле

$$\rho_0 = \frac{m}{V}. \quad (1.1)$$

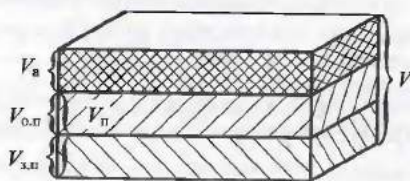


Рис. 1.2. Образец пористого материала:  
 $V$  – объем образца;  $V_n$  – объем вещества;

$V_n$  – объем пор;  $V_{0.n}$  – объем открытых пор;  $V_{3.n}$  – объем закрытых пор

При этом в объем материала входит и объем пор. При определении массы материала в естественном состоянии обычно указывают величину влагосодержания. Учитывая, что пользоваться величинами объемной массы материала при различных значениях влагосодержания неудобно (так как в этом случае  $\rho_0$  получается непостоянной величиной), удобнее при определении  $\rho_0$  использовать величину  $m$  сухого материала (без учета массы воды в порах). Поэтому  $m$  определяют после искусственной сушки материала в сушильном шкафу при температуре 105–110 °С до постоянной массы. Числовые значения объемной массы для различных строительных материалов колеблются в широком диапазоне (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Числовые значения показателей физических свойств наиболее распространенных строительных материалов

Материал	Объемная масса $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Пористость $\Pi$ , %
Пенополистирол	15–20	1050	81–98
Древесина:			
сосна	400–600	1550	61–74
дуб	700–900	1600	42–55
Бетоны:			
ячеистые	500–1200	2500	60–84
легкие	500–1800	2600	40–84
тяжелые	1800–2500	3000	17–40
Красный кирпич	1600–2500	3000	17–40
Стекло оконное	2500	2500	0
Металлы:			
сталь	7800	7800	0
алюминиевые сплавы	2850	2850	0

Плотность (истинная плотность)  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, – масса единицы объема материала в абсолютно плотном состоянии (то есть объем определяют без учета пор, трещин, каверн и других полостей, присущих материалу в его обычном состоянии):

$$\rho = \frac{m}{V_n} \quad (1.2)$$

У большинства материалов  $\rho_0 < \rho$  (так как они содержат поры, трещины и другие неплотности). У непористых материалов практически  $\rho_0 = \rho$  (стекло, металлы, жидкости и т. п.).

Пористость  $\Pi$ , % – степень заполнения объема образца материала порами:

$$\Pi = \frac{V_n}{V} \quad (1.3)$$

Величина пористости у различных материалов колеблется от 0 до 96 % (см. табл. 1.1).

По размерам радиуса  $r$  поры классифицируют на:

микропоры –  $r \leq 10^{-7}$  см;

макропоры –  $r > 10^{-5}$  см;

каверны –  $r > 510^3$  см.

*Гигроскопичность* – способность пористого материала поглощать влагу из воздуха (парогазовой смеси). Она характеризуется влагосодержанием материала – отношением массы влаги, содержащейся в порах материала, к его массе в сухом состоянии – кг/кг, %.

Степень заполнения пор материала прямо зависит от относительной влажности воздуха, температуры, парциального давления смеси. С увеличением относительной влажности и со снижением температуры воздуха гигроскопичность повышается.

Влагой из воздуха заполняются лишь микропоры. Переходные поры и макропоры способны заполняться только при непосредственном контакте материала с водой (например, во время дождя и т. п.). Влага, содержащаяся в микропорах, называется гигроскопической (физически связанной, полусвободной).

Способность материала отдавать влагу в окружающую среду называют влагоотдачей.

Если между влажностью окружающего воздуха и влажностью материала устанавливается равновесие (материал имеет равновесную влажность), материал называют воздушно сухим. Например, в помещении при относительной влажности воздуха 60–65 % равновесная влажность древесины в среднем равна 15 % (0,15 кг/кг). Полное удаление гигроскопической влаги возможно лишь при искусственном нагреве материала при температуре, превышающей 100 °С, в течение нескольких часов или суток. При пожаре этот процесс происходит интенсивнее.

Влага, которая может содержаться в течение какого-то времени в макропорах, называется механической (свободной). Механическая влага постепенно испаряется даже при 100 % влажности воздуха.

*Водопоглощение*  $W$  – способность пористого материала впитывать воду при непосредственном контакте с ней. Различают массовое и объемное поглощение материала.

Массовое водопоглощение  $W_m$ , %:

$$W_m = \frac{m_b}{m} 100 = \frac{(m_{н.в} - m)}{m} 100 \%, \quad (1.4)$$

где  $m_b$  – масса воды в порах образца, кг(г);

$m_{н.в}$  – масса образца после насыщения водой в течение суток, кг(г);

$m$  – масса образца после сушки в сушильном шкафу при температуре 105–110 °С до стабилизации массы кг(г).

Объемное водопоглощение  $W_v$ , %:

$$W_v = \frac{V_b}{V} 100 \% = \frac{m_b}{\rho_b V} = \frac{m_{н.в} - m}{\rho_b V} 100 \%, \quad (1.5)$$

где  $V_b$  – объем воды в порах материала, м<sup>3</sup>(см<sup>3</sup>);

$\rho_b$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup> (г/см<sup>3</sup>).

При контакте материала с водой она проникает лишь в открытые поры. В закрытые (замкнутые) поры вода не проникает. Поэтому объемное водопоглощение называют кажущейся пористостью.

Наличие влаги в порах материала существенно влияет на другие его свойства (механические, теплофизические), а также на его поведение в условиях пожара. По форме связи влаги с материалом существуют не только рассмотренная нами физическая (полусвободная и свободная), но и физико-химическая или адсорбционная влага – на поверхностях кристаллов, стенках пор и т. п., а также химически связанная влага (в молекулах материалов и их компонентов).

**Водопроницаемость** – способность пористого материала пропускать воду под давлением. Характеристикой водопроницаемости служит количество воды, прошедшее в течение 1 ч через 1 см<sup>2</sup> поверхности материала при заданном давлении воды.

Паро- и газопроницаемость оценивают с помощью соответствующих коэффициентов  $\lambda$ ,  $\rho$ . Она равна количеству водяного пара (воздуха), которое проходит через слой материала толщиной 1 м, площадью 1 м<sup>2</sup> в течение 1 ч при разности давлений у противоположных поверхностей образца 10 Па.

### 1.2.2. Механические свойства

Механические (деформационно-прочностные) свойства отражают способность материалов (изделий) сопротивляться действию нагрузок (усилий), возникающих от силовых, тепловых, усадочных и других факторов.

Рассмотрим процесс растяжения стержня (рис. 1.3). Если на стержень действует внешняя (растягивающая) сила  $F$ , то в нем возникают внутренние силы  $f_i$ , суммарно равные внешней силе и направленные в противоположную сторону. Причем  $\sum f_i = F$ . Если взять отношение суммы внутренних сил к площади поперечного сечения стержня  $S$ , то получим механическую характеристику, которая называется напряжением:

$$\sigma = \frac{\sum f_i}{S} = \frac{F}{S}. \quad (1.6)$$

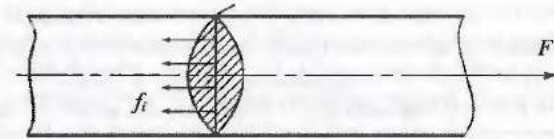


Рис. 1.3. Схема, поясняющая возникновение внутренних напряжений при растяжении стержня:  
 $F$  – внешняя растягивающая сила;  $f_i$  – внутренние силы;  
 $S$  – площадь поперечного сечения образца

В зависимости от направления приложения внешней силы в материале могут возникать напряжения сжатия, растяжения, изгиба, кручения и др.

**Прочность** – это способность материала сопротивляться разрушению за счет внутренних напряжений, возникающих под действием внешней силы.

Возникновение напряжений в материале может происходить также в результате воздействия других факторов, например, температурных градиентов по толщине конструкции. Чем больше величина напряжений, которые способны возникнуть в материале, тем он прочнее. Однако всегда можно приложить такую внешнюю силу  $F_p$ , что сумма внутренних сил окажется недостаточной для ее компенсации. В этом случае происходит разрушение материала, точнее, потеря целостности, так как при  $F < F_p$  материале протекает кинетический процесс накопления нарушений.

Напряжения, соответствующее разрушающей силе, называют **временным сопротивлением** (пределом прочности) материала и обозначают  $R$  (для металла также  $\sigma_b$ ).

В зависимости от вида напряжений, возникающих в материале, различают временное сопротивление сжатию, растяжению, изгибу и др. В простейшем случае растяжения или сжатия материала предел прочности выражается отношением разрушающей силы  $F_{p(c)}$  к площади поперечного сечения образца материала  $S$ :

$$R_{p(c)} = \frac{F_{p(c)}}{S}. \quad (1.7)$$

В случае изгиба

$$R_n = \frac{M_p}{W}, \quad (1.8)$$

где  $R_n$  – временное сопротивление изгибу, Па;

$M_p$  – разрушающий изгибающий момент, Нм;

$W$  – момент сопротивления, м<sup>3</sup>.

Значения временного сопротивления для некоторых материалов приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Числовые значения временного сопротивления некоторых материалов

Материал	Временное сопротивление $R$ , МПа		
	при сжатии $R_c$	при растяжении $R_p$	при изгибе $R_b$
Торфоплиты	0,5	–	0,25–0,2
Бетон обыкновенный	5–30	0,6–2	–
Бетон высокопрочный	40–80	2,5–7	–
Кирпич глиняный	7,5–30	–	1,5–3,5
Древесина (усредненные данные):			
	вдоль волокон	50	130
поперек волокон	6,5	6,5	75
Стеклопластик СВМ	420	450–470	410–460
Гранит	100–250	2–4,4	–
Сталь	380–450	380–450	–

Из данных, приведенных в табл. 1.2, видно, что соотношения между величинами предела прочности при различных вариантах приложения нагрузки зависят от вида материала. Так, для стали величины предела прочности при сжатии и растяжении равны, а для гранита предел прочности при сжатии в 50 раз выше, чем при растяжении. У древесины величина предела прочности зависит от направления приложения нагрузки по отношению к расположению волокон. Прочность древесины вдоль волокон выше, чем поперек.

Материалы, характеризующиеся одинаковыми показателями свойств (в частности, предела прочности) в различных направлениях, называют изотропными, с различными показателями – *анизотропными*.

Временное сопротивление (как и другие механические характеристики) существенно зависит от физических свойств материалов. В частности, чем выше пористость (ниже объемная масса), тем ниже прочность материала.

Поскольку пористые материалы всегда содержат определенное количество гигроскопической влаги, она оказывает капиллярное давление на стенки пор. Учитывая, что пор в материале очень много, суммарное давление достигает значительной величины. Материал вынужден сопротивляться этому давлению за счет внутренних напряжений. Это существенно снижает его прочность, т. е. способность сопротивляться внешней нагрузке.

*Деформативность* – способность образца материала (изделия) изменять свои размеры (форму) без изменения своей массы, характеризуется величиной деформации: абсолютной, относительной.

Деформации образцов (изделий) происходят при растяжении, сжатии, сдвиге, кручении, изгибе и т. п. Все они могут быть обратимыми или необратимыми (остаточными). *Обратимые (упругие) деформации* – те, которые

полностью исчезают при прекращении действия на материал факторов, их вызывающих. *Необратимые деформации* (пластические) накапливаются в период действия факторов, их вызывающих, а после их устранения деформации сохраняются. На характер и величину деформаций влияет не только степень нагружения, но и скорость повышения нагрузки, а также температура материала. Как правило, с понижением скорости нагружения, либо повышением температуры материала величина деформации увеличивается. Пластические деформации, медленно нарастающие без увеличения напряжения, характеризуют текучесть материала.

Пластическая деформация, медленно нарастающая в течение длительного времени под влиянием нагрузки, величина которой недостаточна для того, чтобы вызвать остаточную деформацию за обычные периоды наблюдений, называется *деформацией ползучести*, а процесс такого деформирования – *ползучестью* (крипом).

Помимо предела прочности к прочностным характеристикам материалов относятся предел упругости и предел текучести.

*Упругость* – способность образца материала изменять свою форму под действием нагрузки и восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки.

*Предел упругости*  $\sigma_y$  – максимальное напряжение, при котором в материале еще не возникает остаточных деформаций.

*Пластичность* – способность образца материала изменять свою форму без разрушения под действием нагрузки и сохранять новую форму после прекращения действия нагрузки. Это свойство характеризуется текучестью материала.

*Предел текучести*  $\sigma_T$  – постоянное напряжение при нарастании пластической деформации (см. рис. 1.4).

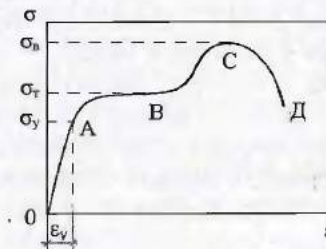


Рис. 1.4. Диаграмма «напряжение – деформация» на примере образца мягкой стали:  $\sigma$  – напряжение;  $\epsilon$  – относительная деформация;  $\sigma_y$  – предел упругости;  $\sigma_T$  – предел текучести;  $\sigma_b$  – предел прочности (временное сопротивление);  $\epsilon_y$  – величина упругой деформации; 0–А – участок упругих деформаций; А–В – участок пластических деформаций; В–С – участок самоупрочнения (наклепа); С–Д – участок разрушения материала



Деформативно-прочностные характеристики материала наглядно характеризует диаграмма напряжений (см. рис. 1.4). При упругой деформации материала справедлив закон Гука, устанавливающий прямопропорциональную зависимость между напряжением и величиной деформации:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (1.9)$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация, например, при растяжении:

$$\varepsilon = \frac{\ell_1 - \ell_0}{\ell_0}, \quad (1.10)$$

здесь  $\ell_0$  – длина образца до растяжения, м;  
 $\ell_1$  – длина образца после растяжения, м;  
 $E$  – модуль упругости (модуль Юнга), Па.

Наличие влаги в пористом материале влияет на их деформативные свойства: коробление, усадку и др. Так, при насыщении пор материала водой он расширяется. В том случае, если в определенных условиях происходит неравномерное (например, одностороннее) увлажнение (в частности, во время дождя) или высушивание, то тонкие образцы (изделия) подвергаются короблению (деформации изгиба) в результате неравномерного по толщине образца действия капиллярных сил влаги в порах материала.

В процессе сушки пористого материала происходит удаление влаги, что ведет к уменьшению объема. Это свойство называется усадкой. Неравномерная сушка и соответственно усадка ведут также к короблению (деформации с изгибом) тонких образцов (изделий).

*Твердость* – способность образца материала сопротивляться проникновению в него другого, более твердого образца материала. Величину твердости для металлов определяют числом Бринелля (НВ), которое представляет собой отношение силы, вдавливающей металлический закаленный шарик в поверхность испытуемого металла, к площади полученного в испытаниях углубления. Твердость каменных материалов определяют по условной десятибальной шкале Мооса, в которой в качестве эталонов принята твердость десяти минералов, расположенных по возрастающей твердости: 1 – тальк, 2 – гипс, 3 – кальцит, 4 – флюорит, 5 – апатит, 6 – полевой шпат (ортоклаз), 7 – кварц, 8 – топаз, 9 – корунд, 10 – алмаз.

### 1.2.3. Теплофизические свойства

Теплофизические свойства характеризуют поведение материалов при воздействии на них тепла.

*Теплопроводность* – способность материала проводить через свою толщину тепловой поток, возникающий вследствие разности температур

на противоположных поверхностях образца (изделия), характеризуется коэффициентом теплопроводности материала  $\lambda$ , Вт/(м·К):

$$\lambda = \frac{Q\tau}{\delta S \Delta t}, \quad (1.11)$$

где  $Q$  – тепло, переданное от обогреваемой поверхности к холодной, Дж;

$\delta$  – толщина образца (изделия), м;

$S$  – площадь обогреваемой поверхности, м<sup>2</sup>;

$\Delta t$  – разность температур противоположных поверхностей образца, °С (К);

$\tau$  – время, с.

*Коэффициент теплопроводности* – количество тепла, проходящего через плиту толщиной 1 м, при площади ее поверхности 1 м<sup>2</sup>, за время 1 с, при разности температур на противоположных поверхностях 1 К.

Числовые значения коэффициента теплопроводности зависят от вида материала (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Среднестатистические значения величин теплофизических характеристик отдельных строительных материалов (при 0 °С)

Материал	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c$ , кДж/(кг·К)
Пенопласты	0,04–0,05	–
Минеральная вата	0,05–0,09	–
Древесина	0,24	2,42–2,75
Кирпич глиняный	0,8–0,85	0,8
Тяжелый бетон	1,0–1,5	0,8
Гранит	3,0–3,5	0,8
Сталь	58	0,42

С повышением пористости (уменьшением объемной массы) одного и того же материала  $\lambda$  уменьшается, так как воздух, содержащийся в порах, имеет очень низкий коэффициент теплопроводности ( $\lambda = 0,023$  Вт/(м·К)). С повышением влагосодержания пористого материала его теплопроводность возрастает, так как коэффициент теплопроводности воды  $\lambda = 0,59$  Вт/(м·К).

*Теплоемкость* – способность материала при нагревании поглощать определенное количество тепла, а при остывании его отдавать характеризуется удельной теплоемкостью:

$$c = \frac{Q}{m \Delta t}, \quad (1.12)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

$m$  – масса материала, кг;

$\Delta t$  – разность температур материала до и после нагревания, К.

Удельная теплоемкость ( $c$ ) – количество тепла, которое необходимо сообщить либо отобрать у 1 кг материала, чтобы изменить его температуру на 1 °С. Числовые значения удельной теплоемкости некоторых строительных материалов приведены в табл. 1.3. У воздуха  $c = 0,97$ , у воды  $c = 4,2$  кДж/(кг·К). Поэтому с повышением влагосодержания пористых материалов их удельная теплоемкость увеличивается.

Температуропроводность – способность образца материала (изделия) изменить температуру при нагревании (охлаждении), характеризуется коэффициентом температуропроводности  $a$ , м<sup>2</sup>/с.

Коэффициент температуропроводности характеризует скорость изменения температуры материала. Его вычисляют по формуле

$$a = \frac{\lambda}{c\rho_0}, \quad (1.13)$$

где  $\rho_0$  – объемная масса материала, кг/м<sup>3</sup>.

Тепловое расширение твердых материалов характеризуется коэффициентами линейного и объемного теплового расширения.

Коэффициент линейного теплового (температурного) расширения  $\alpha$  – относительное изменение длины испытуемого материала при изменении его температуры на 1 К:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta t}, \quad (1.14)$$

где  $\Delta l$  – разность длин образца материала до и после нагрева, м;

$l_0$  – начальная длина образца, м;

$\Delta t$  – разность температур, К.

Коэффициент объемного теплового расширения – относительное изменение объема образца материала при изменении его температуры на 1 К.

$$\beta = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta t}, \quad (1.15)$$

где  $\Delta V$  – разность объемов образца до и после нагрева, м<sup>3</sup>;

$V_0$  – начальный объем образца, м<sup>3</sup>;

$\Delta t$  – разность температур, К.

Числовые значения  $\alpha$  и  $\beta$  для ряда строительных материалов приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Числовые значения коэффициентов линейного и объемного расширения в указанных диапазонах температур для различных материалов

Материал	$\alpha \cdot 10^4, 1/К$	$\beta, 1/К$
Кирпич глиняный	0,009	–
Сосна поперек волокон	0,034	2–34
Сосна вдоль волокон	0,05	2–34
Мрамор	0,014	15–100
Кварц	0,078–0,140	40
Сталь	0,105	0–100

Теплостойкость – способность нагретых материалов (в частности, полимерных) сопротивляться проникновению в них других, более твердых материалов при их соприкосновении, а также деформированию под действием постоянной нагрузки (в нагретом состоянии).

Теплостойкость характеризуется температурой, при которой материал перестает сопротивляться указанным действиям и контролируемые параметры (глубина проникновения испытуемого средства, величина деформации образца) достигают предельных значений.

#### 1.2.4. Свойства, характеризующие пожарную опасность строительных материалов

Под пожарной опасностью принято понимать вероятность возникновения и развития пожара, заключенную в каком-либо веществе, состоянии или процессе.

Согласно ФЗ-123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [2] пожарная опасность строительных материалов определяется следующими пожарно-техническими характеристиками (свойствами материалов): горючестью, воспламеняемостью, распространением пламени по поверхности, дымообразующей способностью и токсичностью продуктов горения. Для оценки степени пожарной опасности строительных материалов используют количественные показатели.

Горючесть – свойство, характеризующее способность материала гореть. Согласно ФЗ-123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» строительные материалы по горючести подразделяют на две основные группы: негорючие (НГ) и горючие (Г).

Согласно ГОСТ 12.1.044–89\* [3] негорючие – материалы, не способные к горению на воздухе. Для негорючих строительных материалов другие показатели пожарной опасности не определяются и не нормируются.

Горючие – вещества и материалы, способные самовозгораться, а также возгораться от источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления.

Экспериментальную оценку показателя группы горючести строительных материалов проводят согласно ГОСТ 30244–94 [4]. Горючие материалы

подразделяются на 4 группы: Г1 – слабогорючие, Г2 – умеренногорючие, Г3 – нормальногорючие, Г4 – сильногорючие в соответствии с ФЗ-123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» и ГОСТ 30244–94.

**Воспламеняемость** – способность материала воспламениться от источника зажигания либо при нагреве до температуры самовоспламенения.

Экспериментальную оценку показателя воспламеняемости строительных материалов проводят согласно ГОСТ 30402–96 [5]. Согласно ГОСТ 30402–96 и ФЗ-123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» горючие материалы по воспламеняемости подразделяют на 3 группы: В1 – трудновоспламеняемые, В2 – умеренновоспламеняемые, В3 – легковоспламеняемые.

**Распространение пламени по поверхности** – способность образца материала распространять пламя по поверхности в процессе его горения.

Экспериментальную оценку показателя (группы) распространения пламени по строительным материалам проводят по ГОСТ 30444–97 (ГОСТ Р 51032–97 [6]). Согласно ГОСТ 30444–97 (ГОСТ Р 51032–97) и ФЗ-123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» горючие материалы по способности распространять пламя по поверхности делят на 4 группы: РП1 – нераспространяющие, РП2 – слабораспространяющие, РП3 – умереннораспространяющие, РП4 – сильнораспространяющие пламя.

**Дымообразующая способность** – способность материала выделять дым при горении, характеризуется коэффициентом дымообразования, определяемым по ГОСТ 12.1.044–89\* [3].

Коэффициент дымообразования – величина, характеризующая оптическую плотность дыма, образующегося при сгорании образца материала в экспериментальной установке.

По величине коэффициента дымообразования строительные материалы подразделяются на 3 группы: Д1 – с малой дымообразующей способностью, Д2 – с умеренной дымообразующей способностью, Д3 – с высокой дымообразующей способностью.

В процессе горения (разложения, тления) органические материалы способны выделять токсичные пары и газы, это свойство характеризуется **показателем (индексом) токсичности**, который определяют по ГОСТ 12.1.044–89 [3].

Показатель (индекс) токсичности продуктов горения полимерных материалов – отношение количества материала к единице объема камеры экспериментальной установки, при сгорании которого выделяющиеся продукты вызывают гибель 50 % подопытных животных.

По показателю токсичности продуктов горения строительные материалы подразделяются на 4 группы: Т1 – малоопасные, Т2 – умеренноопасные, Т3 – высокоопасные, Т4 – чрезвычайно опасные.

В зависимости от групп строительные материалы подразделяются на 6 классов пожарной опасности (табл. 1.5).

Классы пожарной опасности строительных материалов

Свойства пожарной опасности строительных материалов	Класс пожарной опасности строительных материалов в зависимости от групп					
	КМ0	КМ1	КМ2	КМ3	КМ4	КМ5
Горючесть	НГ	Г1	Г1	Г2	Г3	Г4
Воспламеняемость	–	В1	В2	В2	В2	В3
Дымообразующая способность	–	Д2	Д2	Д3	Д3	Д3
Токсичность продуктов горения	–	Т2	Т2	Т2	Т3	Т4
Распространение пламени по поверхности для покрытия полов	–	РП1	РП1	РП2	РП2	РП4

Помимо рассмотренных свойств и показателей пожарной опасности, регламентируемых законом [2], для более полной оценки пожарной опасности строительных и других твердых материалов с помощью методов, включенных в ГОСТ 12.1.044–89\*, в исследовательской практике оценивают и ряд других показателей, в частности: температуры воспламенения и самовоспламенения, кислородный индекс, индекс распространения пламени, скорость распространения пламени, теплоту сгорания материала.

**Температура воспламенения  $t_в$**  – минимальная температура, при которой интенсивность выделения газообразных горючих продуктов разложения достаточна для их зажигания внешним источником и поддержания самостоятельного горения материала при устранении внешнего источника.

**Температура самовоспламенения  $t_{св}$**  – самая низкая температура материала, при которой в условиях специальных испытаний происходит интенсивное увеличение скорости экзотермической реакции, заканчивающейся пламенным горением.

**Кислородный индекс (КИ)** – минимальная концентрация кислорода (%) в кислородно-азотной смеси, необходимая для устойчивого горения материала.

**Индекс распространения пламени** – условный безразмерный показатель, характеризующий способность материала распространять пламя по поверхности.

**Скорость распространения пламени по поверхности материала  $V$ , м/с** – скорость перемещения фронта пламени относительно негоревшего участка.

**Теплота сгорания  $Q_n$ , МДж/кг** – количество тепла, выделяющегося при полном сгорании единицы массы материала.

### 1.3. Сущность физико-химических процессов, приводящих к изменению свойств строительных материалов в условиях пожара

#### 1.3.1. Физические процессы

**Теплоперенос** (теплопередача) – непрерывное перемещение теплового потока от обогреваемой поверхности образца материала (изделия) вглубь (в направлении необогреваемой поверхности – при одностороннем обогреве, рис. 1.5, а [14]).

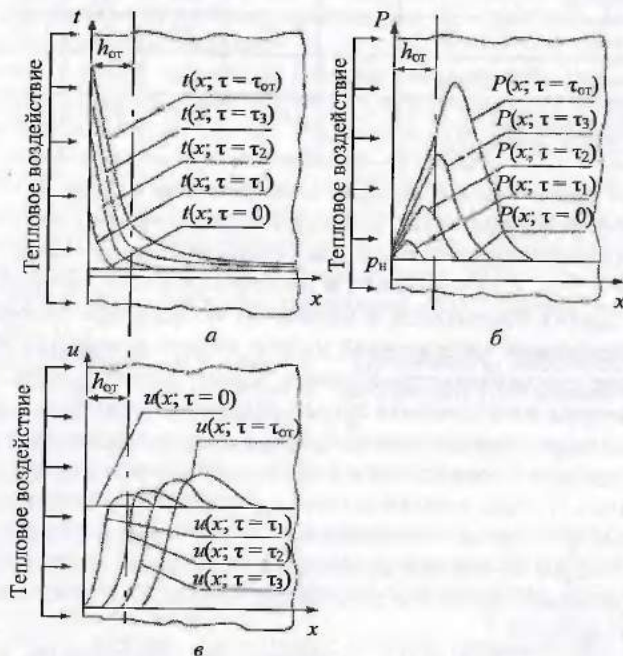


Рис. 1.5. Характер изменения тепловлажностных характеристик:

а – температуры  $t$ ; б – давления пара  $P$ ; в – влагосодержания;  $u$  – образца материала по толщине и в конкретной точке  $h_{от}$  в различные моменты времени  $\tau$  при одностороннем высокотемпературном нагреве ( $x$  – координата по толщине образца,  $\tau$  ( $\tau_1, \tau_2, \tau_3 \dots \tau$ ) – моменты времени от начала нагрева,  $\tau_{от}$  – время откола куска толщиной  $h_{от}$  при взрывообразном разрушении [14])

Основным показателем, характеризующим развитие этого процесса, является температура материала ( $t$  – потенциал теплопереноса). Параметрами, необходимыми для количественной оценки протекания процесса теплопереноса и расчета изменения основного показателя  $t$  при пожаре являются теплофизические характеристики материала ( $\lambda, c, a$ ).

**Влагоперенос** – отражает процесс перемещения влаги в пористой структуре материала одновременно с развитием процесса теплопереноса.

Поскольку отмеченные процессы действуют одновременно, часто их рассматривают как один процесс тепло-влагопереноса. Однако учитывая, что процесс влагопереноса несколько сложнее для понимания, рассмотрим его автономно. При нагреве материала до температуры  $100\text{ }^\circ\text{C}$  влага, содержащаяся в порах, претерпевает температурное расширение, что увеличивает давление на стенки пор, вызывает увеличение внутренних напряжений в материале и снижает его прочность. Дальнейший нагрев материала приводит к переходу воды, содержащейся в порах, в парообразное состояние. При этом сначала влага испаряется с обогреваемой поверхности материала. Затем фазовый переход влаги в пар происходит в так называемой «зоне испарения», которая по мере прогрева постепенно перемещается вглубь образца (строительной конструкции) под влиянием процесса теплопереноса. Учитывая, что объем пор в твердом материале во время нагрева практически не изменяется, интенсивное парообразование (из 1 л воды получается 1700 л пара при нормальных условиях) приводит к быстрому росту давления в порах материала (см. рис. 1.5, б). По мере перемещения зоны испарения вглубь образца материала (изделия) давление в ней возрастает.

Так образуется градиент давления по толщине образца материала (изделия, см. рис. 1.5, б). Поскольку давление пара действует во все стороны одинаково, часть пара под его влиянием фильтруется наружу через образовавшуюся «сухую» зону материала в сторону обогреваемой поверхности. Другая часть пара под действием давления из зоны испарения перемещается вглубь материала, где конденсируется в более холодных его слоях, образуя «зону повышенного влагосодержания». При этом в течение определенного времени за зоной повышенного влагосодержания остается «зона начального влагосодержания» материала.

Влагоперенос приводит к созданию градиента влагосодержания материала по толщине образца (изделия). По мере прогрева материала (под влиянием процесса теплопереноса) ширина зоны начального влагосодержания постепенно уменьшается вплоть до полного ее исчезновения. Кроме того, под действием избыточного давления в сторону необогреваемой поверхности изделия влага выделяется из пор материала и стекает вниз. Затем и эта зона исчезает – по мере достижения зоной испарения необогреваемой поверхности. Если обогрев изделия происходит с нескольких сторон, то и зона испарения образуется соответственно с нескольких сторон и по мере прогрева материала перемещается вглубь (рис. 1.5, в).

Основным показателем процесса влагопереноса является избыточное давление  $P$  пара в зоне испарения. Давление пара является одним из основных стимуляторов процесса разрушения (накопления нарушений,

повреждений структуры) материала. При превышении избыточным давлением некоторой критической величины этот процесс может привести к явлению взрывообразной потери целостности образца (изделия) материала.

В том случае, если величина избыточного давления ниже определенного для данного материала значения, то удаление физически связанной влаги не приводит к явлению взрывообразной потери целостности. При этом после нагрева до температур порядка 100–250 °С может происходить даже некоторое повышение прочности материала. Это обусловлено в основном снятием капиллярного давления влаги на стенки пор материала.

Деформирование образцов материала (изделий) при воздействии пожара происходит в результате влияния ряда факторов, внутренних и внешних, в частности: температуры материала, его влагосодержания, внешнего силового воздействия на образец материала (конструкцию). Под влиянием перечисленных факторов в условиях пожара образцы материала (изделия) могут претерпевать следующие виды деформаций:

- температурные деформации расширения происходят в результате процесса теплопереноса, приводящего к увеличению межатомных расстояний в материале вследствие превращения тепловой энергии в кинетическую энергию атомов, подвижность которых при этом возрастает по мере повышения температуры материала;

- температурно-влажностные деформации капиллярно-пористых материалов при нагреве, которые обусловлены действием процесса тепло-влажностного переноса;

- температурно-влажностно-силовые деформации материала происходят в результате суммарного действия внешней нагрузки на конструкцию (следовательно, и материал) и температурно-влажностных процессов;

- накопление дефектов (разрушение материала).

Существует несколько теорий разрушения материалов. Их условно можно разделить на 2 группы: классическая теория, основанная на науке о сопротивлении материалов, и кинетическая теория.

Известны ряд классических теорий (и их модификаций) прочности (разрушения) твердых тел. Их основы были заложены в исследованиях Галлея, Мариотта, Кулона, Сен-Венана, Губера, Бельтрами, Мизеса, Мора и др., а затем получили дальнейшее развитие в работах Гриффитса, В. П. Дегтярева, В. М. Панферова, Г. В. Ужика и др. Все эти теории основаны на предположении о существовании некоторого критического, порогового напряжения, после достижения которого наступает мгновенное разрушение материала (изделия). При напряжении меньше предельного предполагается, что твердое тело будет оставаться сплошным сколько угодно долго и такое напряжение считается безопасным. Следовательно, разрыв

твердого тела рассматривается как критическое событие, а предел прочности принимается за константу твердого тела. Иными словами, под разрушением эти теории подразумевают мгновенный акт, которому лишь предшествует процесс роста напряжений в материале, однако с его структурой и свойствами ничего не происходит. Следовательно, основной характеристикой, используемой данными теориями при констатации факта разрушения материала, является его предел прочности. Учитывая, что эту характеристику просто определять экспериментально и она изменяется при нагреве материалов в условиях пожара, ее используют в расчетах изменения несущей способности конструкций в условиях пожара (статическая часть задачи огнестойкости конструкций).

О кинетической теории прочности (разрушения) твердых тел можно сказать следующее. Сравнительно недавно в практике эксплуатации жаропрочных сплавов при высоких температурах и полимеров при умеренных температурах столкнулись с явлением так называемой «статической усталости». Было обнаружено, что при статическом нагружении образца вне зависимости от величины действующего напряжения происходит его разрушение и тем быстрее, чем выше эта величина. Явление статической усталости оказалось универсальным, т. е. присущим всем твердым материалам. Разрушение в этом случае представляет собой необратимый кинетический процесс постепенного накопления внутренней поврежденности (дефектов, нарушений) структуры материала, ускоряемый температурой. Экспериментальные исследования поведения ряда твердых строительных материалов (бетона, асбестоцемента, стали) в условиях пожара показали, что процесс разрушения этих материалов при пожаре подчиняется кинетическому закону.

Изменение структуры (модификационные или аллотропические превращения) материала характерно для металлов (сталей), отдельных минералов при изменении температуры (нагреве, охлаждении).

Изменение свойств материалов происходит в результате действия физических и химических процессов в материалах, что ведет соответственно к изменению и числовых показателей, характеризующих эти свойства. Так, в зависимости от температуры изменяются теплофизические, механические характеристики материалов. Изменение структуры и даже состава материалов в результате воздействия пожара ведет к уменьшению объемной массы, увеличению пористости, проницаемости, водопоглощения и т. п.

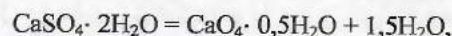
Размягчение – свойственно преимущественно аморфным материалам при нагреве, в частности, отдельным видам полимеров (термопластичных). Это приводит к повышению их пластичности (текучести) и соответственно к снижению упругости, прочности, повышению деформативности.

В существенно меньшей мере, чем аморфные материалы, процессу размягчения подвержены кристаллические материалы (металлы, искусственные каменные материалы) при нагреве. Однако даже незначительное повышение пластичности способствует развитию температурной ползучести этих материалов при нагревании в нагруженном состоянии. Основным показателем рассматриваемого процесса является температура размягчения.

Изменение агрегатного состояния у кристаллических материалов – фазовый переход из твердого состояния в жидкое (и обратно) происходит при определенной температуре плавления. Температура плавления совпадает с температурой затвердевания. При этом в процессе плавления или затвердевания температура материала не изменяется. Данный процесс, во-первых, приводит к снижению прочности материалов до нуля. Во-вторых, пары и газы, которые при этом выделяются, могут оказаться горючими.

### 1.3.2. Химические процессы

*Дегидратация* – химическая реакция отщепления от молекулы вещества химически связанной воды. Этот процесс, например, характерен для ряда природных каменных материалов, в частности, гипса:



а также для искусственных каменных материалов, изготовленных на минеральных вяжущих веществах и др.

Дегидратация молекул компонентов приводит, в частности, к усадке материала, например, цементного вяжущего в искусственных каменных материалах (бетоне, асбестоцементе). В то же время другие компоненты композиционных материалов (например, бетонов) могут расширяться, что приводит к возникновению внутренних усилий в материале, созданию напряженного его состояния, накоплению повреждений – разрушению (снижению прочности).

*Диссоциация* – расщепление (распад) молекул. Эта химическая реакция свойственна, в частности, природным каменным материалам, например, при температуре порядка 900 °С протекает реакция диссоциации известняка (карбоната кальция):



Она характерна также для минеральных вяжущих веществ, которые являются основой искусственных каменных материалов. Эта реакция приводит к снижению объемной массы, прочности материала, увеличению его пористости.

Химическое разложение твердых материалов состоит в том, что при повышении их температуры до определенного для каждого материала значения (температуры начала деструкции) начинается процесс разрыва

химических связей с образованием более простых компонентов (твердых, жидких, газообразных). Причем с повышением температуры скорость химических реакций возрастает. Термическое разложение является чрезвычайно сложным процессом, зависящим от множества параметров. Этот процесс можно разделить на 3 разновидности:

1. Термическая деструкция, при которой сложные молекулы распадаются на более простые звенья.

2. Пиролиз – процесс глубокого расщепления продуктов деструкции вплоть до образования простейших молекул.

3. Термоокислительное разложение при участии кислорода воздуха.

Процесс термоокислительного разложения носит выраженный экзотермический характер и зачастую приводит к воспламенению материала. Процесс разложения материалов при повышенных температурах сопровождается образованием газообразных, жидких веществ, обладающих токсичным действием. Для большинства материалов общим токсичным компонентом продуктов разложения и горения является оксид и диоксид углерода (СО, СО<sub>2</sub>). Наряду с указанными токсикантами органические материалы выделяют и другие токсичные продукты горения, виды которых зависят от химического состава горящего материала.

Таким образом, и химические процессы приводят к разрушению (снижению прочности) материалов и другим негативным последствиям, в частности, горению.

### 1.3.3. Физико-химические процессы

Основным физико-химическим процессом, который происходит с органическими строительными материалами в условиях пожара, является процесс горения.

Глубоко и всесторонне этот процесс, его законы и теоретические основы рассматривают при изучении дисциплины «Теория горения и взрыва».

Горение – сложный физико-химический процесс превращения горючих материалов в продукты горения, сопровождающийся выделением тепла и света.

Процесс горения включает совокупность составляющих его процессов: воспламенения, распространения пламени, тепловыделения, дымовыделения.

Воспламенение – процесс принудительного зажигания горючей смеси, т. е. иницирование горения высоконагретым источником зажигания.

Горение строительных материалов в условиях пожара сопровождается процессом распространения пламени.

Распространение пламени является непрерывным процессом, происходящим за счет тепла, высвобождающегося в результате химической реакции и передвигающегося к несгоревшей части поверхности материала.

Тепловыделение является следствием процесса (сопутствующим процессом) горения строительных (и не только строительных) материалов в условиях пожара. Выделяющееся тепло идет частично на нагрев несгоревшей части горящего материала (на подготовку ее к горению), других горючих материалов, составляющих пожарную нагрузку помещения, на нагрев (теплоперенос) негорючих материалов строительных конструкций.

Дымовыделение также является сопутствующим процессом горения. На пожарах, как правило, горение происходит при недостатке окислителя, что приводит к образованию продуктов неполного сгорания и дымовыделению. Дым представляет собой аэрозоль, состоящий как из твердых (сажи, золы), так и жидких частиц. Оптические свойства дыма характеризуются способностью поглощать и рассеивать свет, что является причиной снижения видимости в задымленном пространстве и ограничения возможности эвакуации людей при пожаре.

Интенсивность дымообразования определяется химической природой материала, а задымление помещений зависит от количества дымообразующих материалов, условий развития пожара, воздействия тепловых потоков от очага пожара и времени. Наибольшее дымообразование достигается при горении материалов в режиме пиролиза (подготовки их к горению) и тления. Дым обычно содержит токсичные продукты горения.

## 2. Методы исследования поведения строительных материалов в условиях пожара

### 2.1. Методы исследования механических характеристик строительных материалов при их нагревании

Экспериментальные исследования механических характеристик неорганических строительных материалов (бетона, арматурных сталей) применительно к условиям пожара проводят в основном с помощью разрушающих методов, в процессе которых происходит разрушение (уничтожение) испытуемых образцов.

Известны несколько методов определения изменения деформативно-прочностных характеристик материалов применительно к условиям пожара, отличающихся последовательностью приложения термического и механического воздействий. Так, до конца 60-х гг. прошлого века широко использовали метод испытания бетона, металлов и других материалов, состоящий из следующих основных технологических операций (последовательность испытаний):

1. Образец материала стандартных размеров нагревают в электропечи до заданной температуры и выдерживают при этой температуре в течение определенного времени до обеспечения равномерного прогрева материала по толщине образца.

2. Образец подвергают воздействию нарастающей механической нагрузки до разрушения непосредственно в нагретом состоянии либо после остывания до начальной температуры.

3. Измеряют величину разрушающей силы  $F_p$ .

4. Вычисляют временное сопротивление (предел прочности)  $R_{tem}$ :

$$R_{tem} = \frac{F_p}{S}, \quad (2.1)$$

где  $S$  – начальная площадь поперечного сечения образца,  $m^2$ , а также относительную величину прочности материала (коэффициент изменения прочности материала при нагреве):

$$m_{tem} = \frac{R_{tem}}{R_{20}}, \quad (2.2)$$

где  $R_{20}$  – временное сопротивление материала разрушению при температуре 20 °С, МПа.

В такой последовательности испытывают серию образцов анализируемого материала при различных температурах. Затем по результатам испытаний строят график изменения абсолютных величин предела прочности. Полученные результаты экспериментальных исследований могут быть использованы в качестве исходных данных при проведении расчетов огнестойкости строительных конструкций.

По мере развития теории расчетов огнестойкости строительных конструкций эти методы перестали соответствовать предъявляемым требованиям, так как предусмотренные в них условия испытаний (вначале нагрев, затем нагружение образцов) не в полной мере отражают работу материала реальной несущей конструкции в условиях пожара. При пожаре конструкция подвергается нагреву уже в заранее нагруженном состоянии. Поэтому в начале 70-х гг. прошлого века были разработаны и с этого времени используются методы испытаний, более приближенные к условиям работы несущих конструкций при пожаре. Это методы испытаний бетона и металлов (в частности, арматурных сталей и алюминиевых сплавов). Они содержат следующие основные технологические операции:

1. Образец материала вначале нагружают до заданной постоянной величины  $\gamma_s, \gamma_b$ :

$$\gamma_s = \frac{\sigma_i}{R}; \gamma_b = \frac{\sigma_i}{R}, \quad (2.3)$$

где  $\gamma_s, \gamma_b$  – относительное напряжение, возникающее соответственно в нагруженном образце арматуры или бетона;

$\sigma_i$  – напряжение в образце от внешней нагрузки, МПа.

2. Нагруженный образец подвергают нагреву по стандартному температурному режиму [8] до момента достижения им предельного состояния: разрушения, предельной деформации, ползучести и т. п.

3. В процессе опыта регистрируют изменение температуры и деформации образца. Затем строят графики зависимости относительной деформации образца от температуры при заданных величинах относительного напряжения от внешней нагрузки. По результатам испытаний образцов (при различных значениях относительного напряжения от внешней нагрузки  $\gamma$ ) также строят графики зависимости этих величин от температуры, называя их, как и  $m_{tem}$ , коэффициентом изменения прочности материала. Эти экспериментальные данные используют в расчетах пределов огнестойкости строительных конструкций.

## 2.2. Классификационные (аттестационные) методы оценки показателей пожарной опасности строительных материалов

Согласно Федеральному закону РФ № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» ст. 13 [2] к строительным материалам предъявляют требования по следующим показателям пожарной опасности: группам горючести, воспламеняемости, распространению пламени, дымообразующей способности и токсичности продуктов горения. Для оценки этих показателей пожарной опасности используют ряд методов, регламентируемых ГОСТ [3–6]. Вначале по методу I ГОСТ 30244–94 относят материал к негорючим (НГ) или к горючим (Г). Если материал относится к негорючим, то другие показатели пожарной опасности для него не определяют. Если материал относится к горючим, то для него по методу

II ГОСТ 30244–94 определяют группу горючести, а затем и другие показатели пожарной опасности в зависимости от назначения материала по методам [3, 5, 6]. Рассмотрим основные положения этих методов испытаний.

### 2.2.1. Метод испытания на горючесть для отнесения материалов к негорючим или к горючим (метод I) [4]

Метод применяют для однородных строительных материалов. Для слоистых материалов метод может использоваться в качестве оценочного. В этом случае испытания проводят для каждого слоя, составляющего материал.

Однородные материалы – материалы, состоящие из одного вещества, равномерно распределенной смеси различных веществ (например, древесина, пенопласты, древесно-стружечные плиты и т. п.). Слоистые материалы – материалы, изготовленные из двух и более слоев однородных материалов (например, гипсокартонные листы, бумажно-слоистые пластики, однородные материалы с огнезащитной обработкой).

Сущность метода состоит в тепловом воздействии на испытуемый образец материала в течение определенного времени и регистрации параметров, характеризующих его поведение при нагреве.

Из предназначенного для испытаний материала готовят не менее 5 образцов цилиндрической формы диаметром 45 мм и высотой 50 мм. Если толщина материала менее 50 мм, то образец необходимой толщины готовят путем составления из нескольких горизонтально расположенных слоев, скрепляя их между собой проволокой. Испытания проводят с помощью установки – трубчатая электропечь (рис. 2.1).

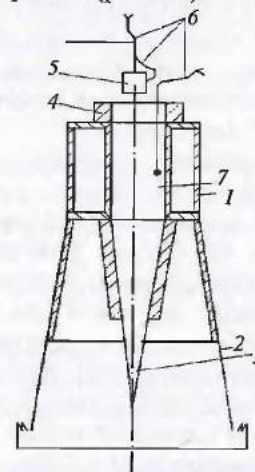


Рис. 2.1. Схема установки для определения группы негорючих материалов [4]: 1 – корпус печи с теплоизоляцией; 2 – экран; 3 – стабилизатор воздушного потока; 4 – вытяжной патрубок; 5 – держатель образца; 6 – термопары; 7 – канал печи



Порядок испытаний следующий:

1. Печь нагревают до  $(750 \pm 5)^\circ\text{C}$  и выдерживают при этой температуре в течение 10 мин.

2. Взвешенный образец помещают в держатель 5 и подвешивают к устройству для ввода образца в печь.

3. Вводят образец в печь и выдерживают, как правило, 30 мин (до достижения в печи температурного баланса).

4. Во время выдержки фиксируют показания термопар в печи, в центре и на поверхности образца, и визуально регистрируют появление и продолжительность устойчивого пламенного горения.

5. После завершения теплового воздействия держатель с образцом извлекают из печи, образец охлаждают в эксикаторе и повторно взвешивают.

Аналогичным образом испытывают 5 образцов.

Материал относят к негорючим, если получены следующие результаты испытаний:

прирост температуры в печи не более чем на  $50^\circ\text{C}$ ;

потеря массы образцов не более 50 %;

продолжительность устойчивого пламенного горения не превышает 10 с.

Если хотя бы один из перечисленных критериев не выполняется, то материал относится к группе горючих.

### 2.2.2. Метод испытания горючих материалов для определения их групп горючести (метод П) [4]

Метод относится к крупномасштабным, что связано с размерами установки (шахтной печи) и образцов испытуемого материала.

Его применяют для испытаний всех однородных и слоистых горючих материалов, в том числе применяемых в качестве отделочных и облицовочных, а также лакокрасочных покрытий.

Сущность метода заключается в воздействии на образец материала пламени газовой горелки в течение 10 мин и регистрации параметров, характеризующих его поведение при огневом воздействии.

Для испытаний берут 12 образцов. Размеры образцов:  $1000 \times 190$  мм, толщина до 70 мм. Для испытаний их располагают вертикально, складывая по 4 в виде короба. Образцы для испытания материалов, применяемых в качестве отделочных и облицовочных, а также для испытаний лакокрасочных покрытий изготавливают в сочетании с негорючей основой. Способ крепления должен обеспечивать плотный контакт поверхностей материала и основы. В качестве негорючей основы используют, как правило, асбестоцементные листы толщиной 10 и 12 мм.

Установка для проведения испытаний представляет собой вертикальную печь шахтного типа (рис. 2.2).

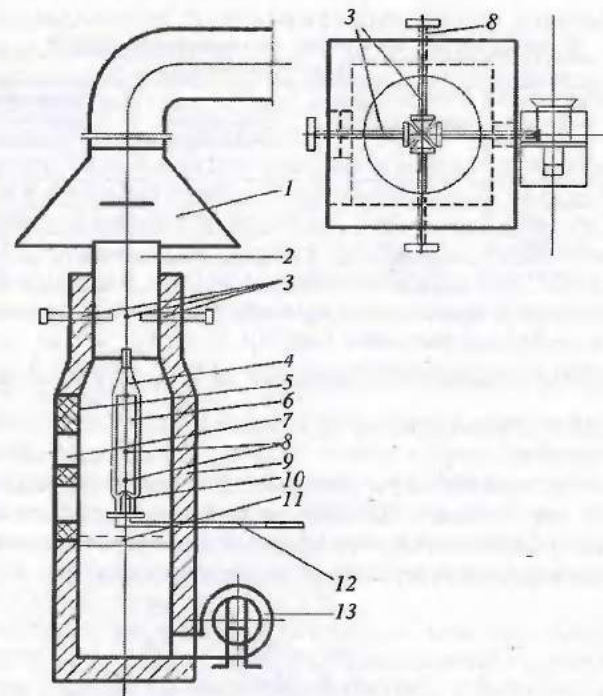


Рис. 2.2. Схема установки для определения группы горючести для горючих материалов [4]:

1 – вытяжной зонт; 2 – дымоход; 3, 8 – термопары;  
4 – держатель образца; 5 – дверь огневой камеры (печи); 6 – опытный образец;  
7 – смотровое окно; 9 – камера сжигания; 10 – газовая горелка; 11 – диафрагма;  
12 – газовый трубопровод; 13 – вентилятор

Последовательность операций в процессе испытаний следующая:

1. Взвешивают образцы и прикрепляют их к раме держателя 4.
2. Вставляют образцы 6 в камеру сжигания 9, закрепляют и закрывают дверь 5.
3. Включают вентилятор 13 (включение вентилятора является началом испытаний).
4. Зажигают газовую горелку 10.
5. С момента начала испытаний в течение 10 мин фиксируют температуру дымовых газов с помощью термопар 8 и время самостоятельного горения образца.
6. После испытаний остывшие образцы извлекают из печи, проводят измерения длины поврежденной части образцов и взвешивают их. Результаты испытаний оценивают по данным табл. 2.1.

Таблица 2.1

Группа горючести материалов	Классификация материалов по группам горючести			
	Параметры горючести			
	Температура дымовых газов $t_d, ^\circ\text{C}$	Степень повреждения по длине $S_L, \%$	Степень повреждения по массе $S_{\text{м}}, \%$	Продолжительность самостоятельного горения $\tau_{\text{св}}, \text{с}$
Г1	$\leq 135$	$\leq 65$	$\leq 20$	0
Г2	$\leq 235$	$\leq 85$	$\leq 20$	$\leq 30$
Г3	$\leq 450$	$> 85$	$\leq 50$	$\leq 300$
Г4	$> 450$	$> 85$	$> 50$	$> 300$

*Примечание.* Для материалов групп горючести Г1–Г3 не допускается образование горящих капель расплава при испытании.

### 2.2.3. Метод испытания материалов на воспламеняемость [5]

Метод применяют для всех однородных и слоистых горючих строительных материалов.

Сущность метода состоит в определении параметров воспламеняемости материала при заданных стандартных уровнях воздействия на поверхность образца лучистого теплового потока и пламени от источника зажигания, которые определяют на приборе, изображенном на рис. 2.3.

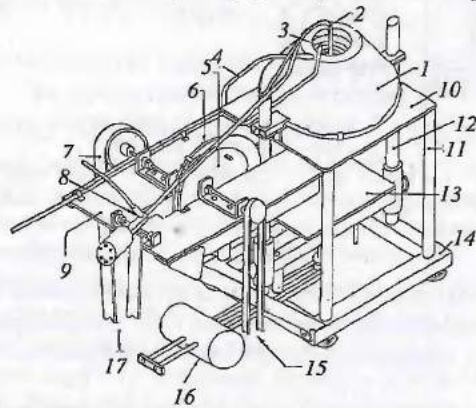


Рис. 2.3. Схема установки для испытания материалов на воспламеняемость [5]:

- 1 – радиационная панель с нагревательным элементом; 2 – подвижная горелка;
- 3 – вспомогательная стационарная горелка; 4 – силовой кабель нагревательного элемента; 5 – кулачок с ограничителем хода для ручного управления подвижной горелкой;
- 6 – кулачок для автоматического управления подвижной горелкой;
- 7 – приводной ремень; 8 – втулка для подсоединения подвижной горелки к системе подачи топлива; 9 – монтажная плита для системы зажигания и системы перемещения подвижной горелки; 10 – защитная плита; 11 – вертикальная опора;
- 12 – вертикальная направляющая; 13 – подвижная платформа для образца;
- 14 – основание опорной станины; 15 – ручное управление; 16 – рычаг с противовесом;
- 17 – привод к электродвигателю

Уровни воздействия лучистого теплового потока должны находиться в пределах от 5 до 50 кВт/м<sup>2</sup>.

Для испытания готовят 15 образцов, имеющих форму квадрата со стороной (165±5) мм, толщиной не более 70 мм.

Порядок испытаний следующий:

1. Образец после кондиционирования оборачивают листом алюминиевой фольги, в центре которого вырезано отверстие диаметром 140 мм.

2. Образец помещают в держатель, устанавливаемый на подвижную платформу и производят регулировку противовеса. Затем держатель с образцом для испытаний заменяют держателем с образцом – имитатором.

3. Устанавливают подвижную горелку в исходное положение, регулируют расход газа (от 13 до 20 мл/мин) и воздуха (от 160 до 180 мл/мин), подаваемых в горелку. Расход газа для вспомогательной горелки регулируют по длине пламени (около 15 мм).

4. Выключают электропитание и по регулирующему термоэлектрическому преобразователю (термопаре) задают полученную при калибровке установки величину термо-ЭДС (напряжения), соответствующую поверхностной плотности теплового потока (ППТП) 30 кВт/м<sup>2</sup>.

5. После достижения заданной величины термо-ЭДС установку выдерживают в этом режиме не менее 5 мин. При этом величина термо-ЭДС не должна отклоняться более чем на 1 %.

6. Помещают экранирующую пластину на защитную плиту, заменяют образец-имитатор на образец для испытания, включают механизм подвижной горелки, удаляют экранирующую пластину и включают регистратор времени.

7. По истечении 15 мин или при воспламенении образца испытание прекращают. Для этого помещают экранирующую пластину на защитную плиту, останавливают регистратор времени и механизм подвижной горелки, удаляют держатель с образцом и помещают на подвижную платформу образец имитатор, убирают экранирующую пластину.

8. Задают величину ППТП 20 кВт/м<sup>2</sup> (если в предыдущем испытании зафиксировано воспламенение) или 40 кВт/м<sup>2</sup> при его отсутствии. Повторяют операции по п. 5–7.

9. Если при ППТП 20 кВт/м<sup>2</sup> зафиксировано воспламенение, уменьшают величину ППТП до 10 кВт/м<sup>2</sup> и повторяют операции п. 5–7.

10. Если при ППТП 40 кВт/м<sup>2</sup> воспламенение отсутствует, задают величину ППТП 50 кВт/м<sup>2</sup> и повторяют операции п. 5–7. При отсутствии воспламенения при ППТП 50 кВт/м<sup>2</sup> проводят еще 2 испытания при этом ППТП, если воспламенение не наблюдается, то испытания прекращают.

11. После определения двух величин ППТП, при одной из которых наблюдается воспламенение, а при другой отсутствует, задают величину ППТП на 5 кВт/м<sup>2</sup> больше той величины, при которой воспламенение отсутствует, и повторяют операции п. 5–7 на трех образцах.

За критическую поверхностную плотность теплового потока (КППТП<sup>В</sup>) принимают наименьшую величину ПППП, при которой для трех образцов зафиксировано воспламенение. Оценку воспламеняемости материалов проводят по табл. 2.2.

Классификация материалов по группам воспламеняемости

Таблица 2.2

Группа воспламеняемости материала [2, 5]	КППТП <sup>В</sup> , кВт/м <sup>2</sup>
В1 – трудновоспламеняемые	35–50
В2 – умеренновоспламеняемые	20–35
В3 – легковоспламеняемые	< 20

#### 2.2.4. Метод испытания материалов на распространение пламени по поверхности [6]

Метод применяют для испытания всех однородных и слоистых горючих материалов, используемых в поверхностных слоях полов и кровель зданий.

Сущность метода состоит в определении КППТП<sup>ПП</sup>, величину которого устанавливают по длине распространения пламени по образцу в результате воздействия теплового потока на его поверхность.

Длина распространения пламени  $L$  – максимальная величина повреждения поверхности образца в результате распространения пламенного горения.

Для испытаний изготавливают 5 образцов материала размером 1100×250 мм. Для анизотропных материалов изготавливают 2 комплекта образцов (например, по утку и по основе). Образцы изготавливают в сочетании с негорючей основой. Способ крепления материала к основе должен соответствовать используемому в реальных условиях. В качестве негорючей основы применяют асбестоцементные листы толщиной 10 или 12 мм. Толщина образца с негорючей основой должна составлять не более 60 мм.

Испытательная установка (рис. 2.4) состоит из следующих основных блоков:

- испытательной камеры с дымоходом и вытяжным зонтом;
- источника лучистого теплового потока (радиационной панели);
- источника зажигания (газовой горелки);
- держателя образца и устройства для введения держателя в испытательную камеру (платформу).

Установку оборудуют приборами для регистрации и измерения температуры в испытательной камере и дымоходе.

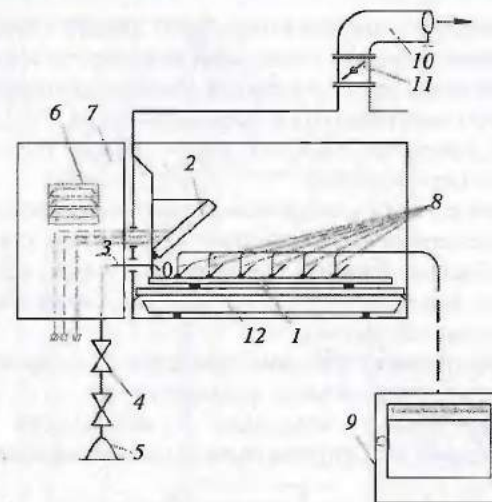


Рис. 2.4. Схема установки для определения группы распространения пламени по поверхности материалов [6]:

- 1 – испытываемый образец; 2 – электроннагревательная панель; 3 – газовая пилотная горелка; 4 – регулировочный вентиль; 5 – баллон с пропаном; 6 – дверца; 7 – окно с дефлекторными пластинами; 8 – термопара; 9 – потенциометр; 10 – вытяжной воздуховод; 11 – поворотная заслонка; 12 – противень

Порядок испытаний следующий:

1. После калибровки установки, т. е. после установления требуемых ГОСТ [6] величин ПППП в заданных точках калибровочного образца и по его поверхности, а также подготовки ее к работе открывают дверцу камеры и зажигают газовую горелку, располагая ее так, чтобы расстояние до экспонируемой поверхности составляло не менее 50 мм.

2. Устанавливают образец в держатель, фиксируют, помещают на платформу и вводят в камеру.

3. Закрывают дверцу камеры и включают секундомер. После выдержки в течение 2 мин приводят пламя горелки в контакт с образцом в точке 0, расположенной на центральной оси. Оставляют факел пламени в этом положении в течение 10 мин. По истечении времени горелку возвращают в исходное положение.

4. При отсутствии воспламенения образца в течение 10 мин испытание считают законченным. В случае воспламенения образца испытание заканчивают при прекращении пламенного горения или по истечении 30 мин от начала воздействия на образец газовой горелки путем принудительного гашения. В процессе испытания фиксируют время воспламенения и продолжительность пламенного горения.

5. После окончания испытания открывают дверцу камеры, выдвигают платформу, извлекают образец. Испытания каждого последующего образца проводят после охлаждения держателя образца до комнатной температуры и проверки соответствия ПППП требованиям ГОСТ [6].

6. Измеряют длину поврежденной части образца по его продольной оси для каждого из пяти образцов.

Повреждением считается выгорание и обугливание материала образца в результате распространения пламенного горения по его поверхности. Оплавление, коробление, спекание, вспучивание, усадка, изменение цвета, формы, нарушение целостности образца (разрывы, сколы поверхности) повреждением не считаются.

Длину распространения пламени определяют как среднее арифметическое по длине поврежденной части пяти образцов.

Горючие строительные материалы в зависимости от величины КППП<sup>РП</sup> подразделяют на 4 группы распространения пламени (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Классификация материалов по распространению пламени	
Группа распространения пламени по материал [2, 6]	КППП <sup>РП</sup> , кВт/м <sup>2</sup>
РП1 – нераспространяющие пламя	≥ 11
РП2 – слабораспространяющие пламя	8–11
РП3 – умереннораспространяющие пламя	5–8
РП4 – сильнораспространяющие пламя	< 5

### 2.2.5. Метод экспериментального определения коэффициента дымообразования твердых веществ и материалов [3]

Сущность метода состоит в фотометрической регистрации ослабления освещенности при прохождении света через задымленное пространство.

Определение удельной оптической плотности дыма на единицу потери массы образца проводят с помощью двухкамерной установки, состоящей из камеры сгорания (объемом 0,003 м<sup>3</sup>) и дымовой камеры (объемом 0,51 м<sup>3</sup>) с измерительной аппаратурой (рис. 2.5).

Для испытания изготавливают не менее 10 образцов 40×40×10 мм. Отделочные и облицовочные материалы, а также лакокрасочные и пленочные покрытия испытывают нанесенными на ту же основу, которая принята в реальной конструкции.

Испытания проводят в двух режимах: термоокислительного разложения (тления) и пламенного горения. Первый режим (тление) обеспечивается при воздействии на образец теплового потока плотностью 18(+1) кВт/м<sup>2</sup>. Материалы, более стойкие к термоокислительной деструкции, испытывают при плотности теплового потока 35(+1) кВт/м<sup>2</sup>. Во всех случаях материалы не должны самовоспламеняться при испытании.

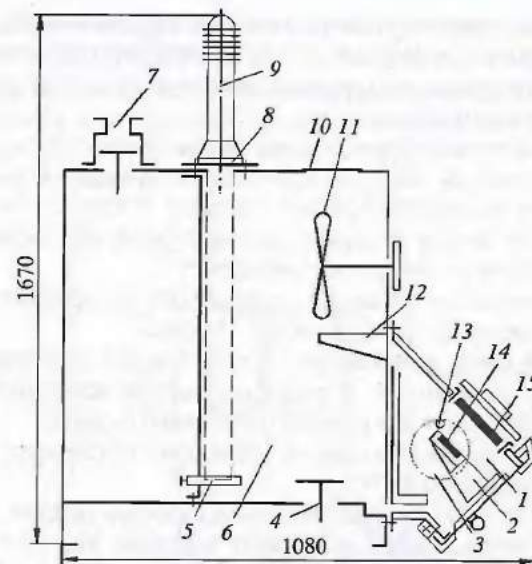


Рис. 2.5. Схема установки для определения коэффициента дымообразования материалов [3]:

- 1 – камера сгорания; 2 – держатель образца; 3 – окно из кварцевого стекла; 4, 7 – клапаны продувки; 5 – приемник света; 6 – камера измерений; 8 – кварцевое стекло; 9 – источник света; 10 – предохранительная мембрана; 11 – вентилятор; 12 – направляющий козырек; 13 – запальная горелка; 14 – вкладыш; 15 – электронагревательная панель

Режим пламенного горения обеспечивается при одновременном воздействии на испытуемый образец газовой горелки и теплового потока плотностью 35(+2) кВт/м<sup>2</sup>.

Перед проведением испытаний в режиме пламенного горения подготовку проводят в такой последовательности:

1. Вставляют в держатель 2 вкладыш с тарировочным (асбестоцементным) образцом.
2. Закрывают обе камеры.
3. Подают на спирали электронагревательной панели 15 напряжение, а также подают напряжение на спираль, обогревающую защитное стекло 3.
4. После выхода панели на стационарный режим нагрева включают осветитель 9, измерительный прибор люксметра, вентилятор перемешивания 11.
5. Открывают камеру сгорания 1.
6. Вынимают вкладыш с асбестоцементным образцом.
7. Зажигают газовую горелку.
8. Закрывают камеру.

9. Производят продувку камеры сгорания в течение 1 мин.

10. Регулируют диафрагмами осветитель, установив освещенность 100 лк и диаметр пучка света, равный диаметру светочувствительной поверхности фотоэлемента 5.

Порядок испытаний состоит в следующем:

1. Подготовленный образец испытуемого материала устанавливают во вкладыш.

2. Открывают дверцу камеры сгорания 1, быстро вставляют вкладыш в держатель 2 образца и закрывают дверцу.

Продолжительность испытания определяют по времени достижения минимальной освещенности, но не более 15 мин.

При испытании в режиме термоокислительного разложения (тления) газовую горелку не зажигают. Порядок проведения испытаний аналогичен порядку, установленному для режима пламенного горения.

В случае самовоспламенения образцов температуру испытания уменьшают с интервалом 50 °С.

Испытывают по 5 образцов материала в каждом режиме.

По результатам каждого испытания в режиме тления и пламенного горения коэффициент дымообразования, м<sup>2</sup>/кг, вычисляют по формуле

$$D_m = \frac{V}{Lm} \ln \frac{T_0}{T_{\min}}, \quad (2.4)$$

где  $V$  – объем дымовой камеры, м<sup>3</sup>;

$L$  – длина светового луча в задымленной газовой среде, м;

$m$  – масса исследуемого материала, кг;

$T_0, T_{\min}$  – начальная и минимальная освещенность соответственно, лк.

Затем отдельно (для режимов тления и пламенного горения) вычисляют средние арифметические значения пяти измерений. За окончательный результат принимают наибольшую из двух полученных величин. По величине коэффициента дымообразования материалы классифицируются на следующие группы [2, 3] (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Классификация материалов по дымообразующей способности	
Группа по дымообразующей способности	Коэффициент дымообразования $D_m$ , м <sup>2</sup> /кг
Д1 – с малой дымообразующей способностью	≤ 50
Д2 – с умеренной дымообразующей способностью	50–500
Д3 – с высокой дымообразующей способностью	> 500

## 2.2.6. Метод экспериментального определения показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов

Сущность метода определения показателя токсичности продуктов горения заключается в установлении количественной зависимости летального эффекта продуктов горения от массы материала, отнесенной к единице объема замкнутого пространства.

Метод реализуется с помощью экспериментальной установки, изображенной на рис. 2.6.

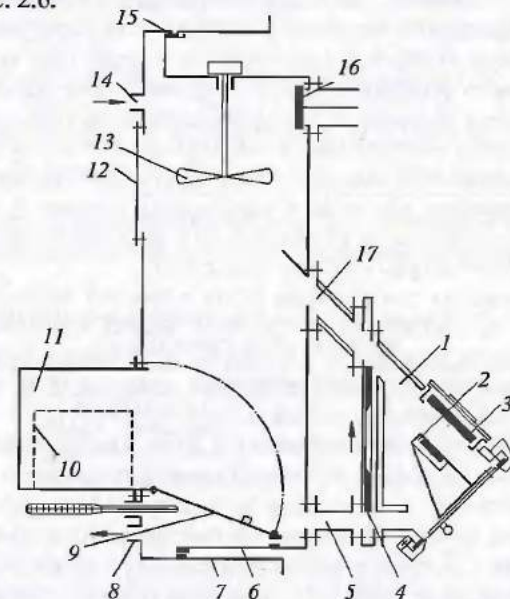


Рис. 2.6. Схема экспериментальной установки для определения показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов [3]:

- 1 – камера сгорания; 2 – держатель образца; 3 – электронная нагревательная панель;
- 4 – заслонки; 5, 17 – переходные рукава;
- 6 – стационарная секция экспозиционной камеры;
- 7 – подвижная секция экспозиционной камеры; 8, 14 – штуцеры;
- 9 – дверцы предкамер; 10 – клетка для подопытных животных; 11 – предкамера;
- 12 – предохранительная мембрана; 13 – вентилятор;
- 15 – резиновая прокладка; 16 – клапан продувки

Для испытаний готовят не менее 10 образцов с размерами в плане 60×60 мм и реальной толщиной не более 10 мм.

Как и по методу определения коэффициента дымообразования, испытания проводят в двух режимах: термоокислительного разложения и пламенного горения. В предварительных опытах определяют для каждого материала температурный режим, способствующий выделению более токсичных продуктов горения.

Для герметизации камеры 1 (см. рис. 2.6) нагнетают воздух в надувную прокладку, вставляют в держатель образца 2 вкладыш с контрольным образцом из асбестоцемента размерами 60×60×10 мм. На центральном участке обогреваемой поверхности образца закрепляют термоэлектрический преобразователь. Закрывают заслонки 4 переходных рукавов 5, 17 и внутреннюю дверцу предкамеры 9, выводят установку на режим пламенного горения. После выхода электронагревательной панели 3 на стационарный режим открывают заслонки 4 переходных рукавов и дверцу камеры сгорания. Вынимают вкладыш с контрольным образцом и термопарой, зажигают газовую горелку. Устанавливают в держатель вкладыш с образцом исследуемого материала. После воспламенения образца газовую горелку немедленно отключают. Продолжительность горения образца определяют по времени достижения максимальных значений концентрации CO и CO<sub>2</sub> в экспозиционной камере 6, 7 или принимают равным (5±0,5) мин.

Затем закрывают заслонки 4 переходных рукавов 5, 17 и включают вентилятор перемешивания 13. Клетку 10 с животными помещают в предкамеру, наружную дверцу которой закрывают.

После снижения температуры газов в нижней части экспозиционной камеры до 30 °С открывают внутреннюю дверцу 9 предкамеры и фиксируют время начала экспозиции животных. Экспозицию проводят в течение (30±0,5) мин при концентрации кислорода не менее 16 %. В каждом испытании используют 10 белых мышей массой по (20±2) г.

По истечении времени экспозиции открывают клапан продувки заслонки переходных рукавов, наружную дверцу предкамеры, включают вентилятор и вентилируют установку в течение (10±1) мин. Регистрируют число погибших мышей и характерные признаки интоксикации.

Испытания в режиме термоокислительного разложения (тления) проводят при температуре (400±5) °С, при этом газовую горелку не зажигают. Материалы, разлагающиеся при более высокой температуре, испытывают при температуре (600±5) °С (плотность теплового потока (38±1) кВт/м<sup>2</sup>). В случае самовоспламенения образца температуру испытания уменьшают с интервалом 50 °С. Критерием выбора режима испытаний служит наибольшее число летальных исходов в сравниваемых группах подопытных животных. При определении токсичного эффекта учитывают гибель животных, наступившую во время экспозиции, а также в течение последующих 14 сут. В зависимости от состава материала (при анализе их продуктов горения) определяют количество оксида и диоксида углерода, цианистого водорода, акрилонитрила, хлористого водорода, бензола, окислов азота, альдегидов и других веществ. Полученный ряд значений зависимости летальности от массы материала используют для расчета показателя токсичности  $N_{Cl_{50}}$ , г/м<sup>3</sup>. Значение показателя токсичности продуктов горения используют для сравнительной оценки пожарной опасности

полимерных материалов. По величине указанного показателя и времени экспозиции в соответствии с «Техническим регламентом о требованиях пожарной безопасности» их классифицируют на 4 группы (табл. 2.5).

Таблица 2.5

Классификация горючих строительных материалов по токсичности продуктов горения [2]

Класс опасности	Показатель токсичности продуктов горения от времени экспозиции, г/м <sup>3</sup>			
	5 мин	15 мин	30 мин	60 мин
Малоопасные	Более 210	Более 150	Более 120	Более 90
Умеренно-опасные	Более 70, но не более 210	Более 50, но не более 150	Более 40, но не более 120	Более 30, но не более 90
Высокоопасные	Более 25, но не более 70	Более 17, но не более 50	Более 13, но не более 40	Более 10, но не более 30
Чрезвычайно-опасные	Не более 25	Не более 17	Не более 13	Не более 10

В зависимости от назначения строительных материалов предусмотрена номенклатура необходимых показателей их пожарной опасности (табл. 2.6).

Таблица 2.6

Номенклатура необходимых показателей пожарной опасности строительных материалов [2]

Строительный материал	Показатель пожарной опасности				
	Группа горючести	Группа распространения пламени	Группа воспламеняемости	Коэффициент дымообразования	Показатель токсичности продуктов горения
Отделочные и облицовочные материалы	+	-	+	+	+
Материалы для покрытия полов	+	+	+	+	+
Ковровые покрытия полов	-	+	+	+	+
Кровельные материалы	+	+	+	-	-
Гидроизоляционные и пароизоляционные материалы толщиной более 2 см	+	-	+	-	-
Теплоизоляционные материалы	+	-	+	+	+

### 3. Каменные материалы, их поведение в условиях пожара и способы повышения стойкости к его воздействию

Для прогнозирования и регулирования поведения каменных материалов в условиях пожара необходимо знать их происхождение (сущность технологии изготовления), состав, структуру, свойства, т. е. комплекс внутренних факторов, влияющих на поведение материала в условиях пожара (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Структурная схема-ключ к изучению, оценке, прогнозированию и регулированию поведения минеральных (каменных) материалов в условиях пожара и определению области их применения

Учитывая, что ряд искусственных каменных материалов (например, тяжелый бетон) могут представлять собой композицию из неорганического вяжущего вещества и заполнителя в виде измельченной горной породы, их поведение в условиях пожара будет зависеть как от автономного поведения составляющих их компонентов, так и от их взаимодействия. Поэтому представляется целесообразным лишь после ознакомления с отдельными простыми материалами и их поведением в условиях пожара рассмотреть более сложные материалы – конгломераты.

#### 3.1. Особенности состава, строения и свойств природных каменных материалов

Природные (естественные) каменные материалы получают из недр земли путем добычи и обработки горных пород, придавая определенную форму и рациональные размеры, но не изменяя их внутреннего строения, состава, а следовательно, и свойств. Горные породы состоят из породообразующих минералов.

##### 3.1.1. Основные виды породообразующих минералов

Минералами называют неорганические природные вещества. К числу главных породообразующих минералов относятся кремнезем, глинозем, алюмосиликаты, железисто-магнезиальные силикаты, карбонаты, сульфаты.

Кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ) встречается в виде кварца, который входит в состав горных пород – гранита, пемзы, кварцевого песка и др. Механические характеристики кварца и других материалов представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Физико-механические характеристики некоторых породообразующих минералов

Материал	Химическая формула	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Временное сопротивление $R_c$ , МПа
Кварц (в-модификация)	$\text{SiO}_2$	2650	2000
Корунд	$\text{Al}_2\text{O}_3$	4000	–
Полевой шпат	$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	2550–2760	120–170
Слюда	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})[\text{SiAlO}_{10}][\text{Fe}_2\text{O}_3]_2$	2760–3200	–
Каолинит	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	2600	–
Хризотиласбест	$3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$		3000 <sup>*</sup> ; 200 <sup>**</sup>
Кальцит	$\text{CaCO}_2$	2700	–
Гипс	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2300	–

\* Временное сопротивление растяжению недеформированных волокон.

\*\* Временное сопротивление растяжению распущенных волокон.

Кварц способен при повышении температуры претерпевать модификационные (структурные) изменения (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Модификационные превращения кварца при нагреве и остывании

Модификация кварца	$\beta$ -кварц $\leftrightarrow$ $\alpha$ -кварц $\leftrightarrow$ $\alpha$ -тридимит $\leftrightarrow$ $\alpha$ -кристобалит $\leftrightarrow$ расплав			
Температура превращения, °С	575	870	1470	1710
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2650	2600	2300	2210
Увеличение объема, %	+2,4	+12,7	+4,7	+0,1

**Глинозем** ( $Al_2O_3$ ) встречается в виде корунда. Корунд (см. табл. 3.1) имеет высокую температуру плавления – 2020 °С и используется для получения высокоогнеупорных материалов. Глинозем встречается в виде химических соединений с водой, с кремнеземом и другими оксидами, например, диаспор – моногидрат глинозема  $Al_2O_3 \cdot H_2O$  входит в состав бокситов, используемых как сырье для производства глиноземистого цемента и алюминия.

**Алюмосиликаты** – соединения глинозема и кремнезема с другими веществами образуют, в частности, полевые шпаты: калиевый полевой шпат, натриевый полевой шпат, кальциевый полевой шпат (см. табл. 3.1). Они встречаются в свободном состоянии, а также входят в состав горных пород, например, гранита, базальта. Применяют полевые шпаты в качестве облицовочного камня.

**Слюды** – водные алюмосиликаты, например: калиевая слюда (мушкетит), железисто-магнезиальная слюда (биотит). В результате окисления и гидратации биотита образовался вермикулит – гидрослюда – при нагревании и дегидратации увеличивается в объеме в 18–25 раз. Это свойство используют при производстве теплоизоляционных материалов, огнезащитной силикатной краски СКЛ. Каолинит – водный алюмосиликат – основной компонент глин.

**Железисто-магнезиальные силикаты.** Представитель их – оливин, который преобразовался в серпентинит; одна из его разновидностей – хризотиласбест – имеет волокнистое строение. Хризотиласбест используют в асбестоцементной промышленности и в производстве теплоизоляционных материалов.

**Карбонаты.** Важнейший минерал этой группы – кальцит  $CaCO_3$  является основой горных пород: известняка, мергеля, мрамора.

**Сульфатные минералы (сульфаты).** Наиболее распространенный представитель – гипс.

### 3.1.2. Основные виды горных пород

Горными породами называют природные композиции минералов приблизительно постоянного минералогического и химического составов, образующие самостоятельные геологические тела, составляющие земную кору.

Различают мономинеральные горные породы – из одного минерала и полиминеральные горные породы – из нескольких минералов. По геологическому происхождению горные породы делятся на три группы: первичные (изверженные), вторичные (осадочные), метаморфические. Эти группы делятся на ряд подгрупп.

**Изверженные горные породы** (гранит, базальт и др.) образовались в результате вулканической деятельности из застывшей магмы. Гранит (рис. 3.2) – это полиминеральная горная порода, состоящая из капицевого полевого шпата 40–70 %, кварца 20–40 %, слюды 5–20 %.



Рис. 3.2. Образец горной породы гранита

Базальт состоит из полевых шпатов – до 50 %, оливина и небольших вкраплений вулканического стекла.

При извержениях вулканов вместе с расплавленной магмой выбрасывается большое количество рыхлого и порошкообразного материала – обломочные породы, которые, в свою очередь, делятся на рыхлые – вулканический пепел, пемза, перлит и уплотненные – вулканический туф.

Пемза (пористость до 80 %) состоит из кремнезема до 70 % и глинозема до 15 %.

Физико-механические характеристики гранита и других горных пород представлены в табл. 3.3.



Таблица 3.3

## Физико-механические характеристики горных пород

Горная порода	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	Временное сопротивление $R_c$ , МПа	Состав
Гранит	2600–2700	100–300	Полевой шпат, кварц, слюда
Базальт	2700–3300	260	Полевой шпат, оливин
Пемза	400–1400	2	Кремнезем, глинозем
Вулканический туф	750–1350	8–19	Мономинеральная порода
Известняк (рис. 3.3)	1700–2600	8–100	Кальций
Мрамор (рис. 3.4)	2600–2800	120–300	Кальций



Рис. 3.3. Образец горной породы известняка



Рис. 3.4. Образец горной породы мрамора

Перлит состоит из кремнезема. При нагреве до 1000–1200 °С перлит увеличивается в объеме в 10–20 раз, в связи с чем его применяют для теплоизоляционных материалов.

Вулканический туф образовался в результате уплотнения вулканического пепла ( $\Pi = 40\text{--}70\%$ ,  $\lambda = 0,21\text{--}0,33 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$ ).

Осадочные горные породы (глина, песок, гравий, песчаник (рис. 3.5), гипс, известковый туф, мел, мергель) образовались в результате разрушения первичных горных пород.



Рис. 3.5. Образец горной породы песчаника

Глина образовалась из калиевого полевого шпата. Она состоит из каолинита с примесями.

Песок образовался в результате разрушения различных горных пород.

Гипс – горная порода, состоящая из минерала того же названия.

Известняк – мономинеральная горная порода, состоящая главным образом из кальцита  $\text{CaCO}_3$ .

Мергели – природная смесь известняка и глины – готовое сырье для производства портландцемента (содержит 50–80 %  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$ , от 20 до 50 % глины).

Метаморфические горные породы образовались в результате изменений изверженных и осадочных горных пород под высокими давлениями и температурами, имеют высокую объемную массу и прочность, например, мрамор, образовавшийся из известняков.

Достоинствами природных каменных материалов являются высокая прочность (см. табл. 3.3), долговечность, водостойкость и морозостойкость, хорошие декоративные качества. К недостаткам можно отнести малое временное сопротивление растяжению и изгибу, большую объемную массу. Указанные качества определяют область применения природных каменных материалов в строительстве.

### 3.2. Основные виды искусственных каменных материалов, их характеристики и особенности

Искусственные каменные материалы бывают безобжиговые и получаемые обжигом. Первые (бетоны, асбестоцемент, силикатные материалы)

изготавливают соединением минерального вяжущего вещества с водой и заполнителем из природных каменных материалов в процессе соответствующей технологической обработки (механической, тепловой, влажностной). Вторые получают путем обжига сырья из природных каменных материалов при высоких температурах (керамические) либо нагрева сырья до расплавления (каменное литье, минеральные расплавы) с последующим охлаждением, сопровождающимся их затвердеванием.

В целях понимания поведения первой группы материалов в условиях пожара ознакомимся с вяжущими веществами.

### 3.2.1. Основные сведения о неорганических вяжущих веществах

Неорганические (минеральные) вяжущие вещества делят на две основные группы:

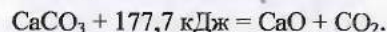
*воздушные вяжущие* – вещества, способные твердеть после соединения с водой и сохранять прочность только на воздухе, например: гипс, воздушная известь, жидкое стекло;

*гидравлические вяжущие* – вещества, способные после соединения с водой твердеть и сохранять прочность на воздухе и в воде: портландцемент и его разновидности, глиноземистый цемент, гидравлическая известь и др.

В некоторых специальных случаях рассматривают третью группу – *кислотостойкие вяжущие* – вещества, способные твердеть и сохранять свою прочность после твердения не только на воздухе или в воде, но и в агрессивной среде.

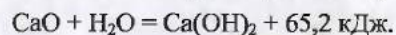
Неорганические вяжущие получают путем обжига горных пород и последующего измельчения после охлаждения.

*Воздушная известь* – продукт умеренного обжига карбонатных горных пород – известняков, мела. При обжиге сырье диссоциирует по реакции

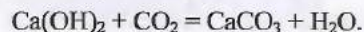


Температура обжига (теоретическая) равна 910 °С; на практике – 1000–1200 °С, так как необходимо исключить обратное протекание реакции. Полученный оксид кальция называют негашеной известью (комовой, известью – кипелкой). Комки имеют крупнопористую структуру, поскольку выделившийся  $\text{CO}_2$  составляет 44 % массы исходного материала, а уменьшение объема за счет усадки происходит всего на 14 %.

С момента затворения водой  $\text{CaO}$  происходит ее гидратация (гашение):



$\text{Ca(OH)}_2$  в процессе эксплуатации реагирует с  $\text{CO}_2$  из воздуха, происходит процесс карбонизации по реакции



Образующиеся при этом кристаллы  $\text{CaCO}_3$  срastaются с кристаллами

$\text{Ca(OH)}_2$ , что уплотняет и упрочняет известковый раствор. Известь применяют в основном для приготовления строительных растворов, т. е. в смеси с песком или другими заполнителями, поскольку чистый известковый раствор при высыхании и твердении растрескивается из-за большой усадки. Известково-песчаные растворы через 28 сут (нормативный срок твердения) имеют невысокую прочность:  $R_c = 2\text{--}3$  МПа. Известь входит в состав строительных растворов для кладки наземных сооружений и штукатурных работ, ее используют при производстве силикатного кирпича и других силикатных материалов, а также в качестве связующего вещества для известковых огнезащитных обмазок.

*Строительный гипс* (алебастр) получают путем термической обработки гипсового камня, состоящего в основном из минерала гипса  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Природный гипс вяжущими свойствами не обладает. Однако при нагревании выше 70 °С (в производственных условиях нагревают до 110–180 °С) происходит его дегидратация с образованием полуводного гипса, обладающего вяжущими свойствами:



Получаемый полуводный гипс  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  носит название строительного гипса. При затворении строительного гипса водой в количестве 60–70 % (по массе) образуется пластичное тесто, которое быстро загустевает, переходит в камневидное состояние с постепенным нарастанием прочности ( $R_c = 5,5$  МПа через 1,5 ч), в дальнейшем сопротивление гипса сжатию возрастает до 25 МПа. С момента затворения строительного гипса водой идет реакция гидратации:



В связи с высокой пористостью гипсовый камень обладает довольно низкой теплопроводностью, его используют в качестве теплоизоляционного материала, в штукатурных растворах, для производства панелей и блоков для перегородок, стен, вентиляционных коробов, гипсокартонных и гипсоволокнистых листов.

Наиболее широко применяемым в строительстве гидравлическим вяжущим веществом является *портландцемент*. Его производят порядка 60–65 % от всех вяжущих.

Портландцементом называют гидравлическое вяжущее вещество – продукт тонкого измельчения клинкера, который получают в результате обжига до спекания сырьевой массы, обеспечивающей преобладание в клинкере силикатов кальция.

В качестве идеального сырья для получения портландцемента служат мергели. Однако в природе их немного, поэтому сырьевую смесь

составляют из двух и более компонентов – из известняков, мела и глины (каолинит), т. е. осадочных горных пород, содержащих кремнезем  $\text{SiO}_2$ , глинозем  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и оксид железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; соотношение в сырьевой массе: известняк (мел)  $\text{CaCO}_3$  – 75–78 %; глина –  $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{Fe}_2\text{O}_3)$  – 25–22 %.

Основным процессом данной технологии является обжиг сырьевой смеси в печах, в которых происходит следующее:

1. Поступающий в печь шлам (физический раствор сырьевой смеси в воде) подсушивается и нагревается.

2. При температурах 500–800 °С удаляется химически связанная вода, при этом глина распадается на составляющие элементы:

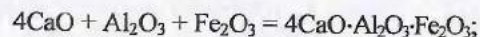
$2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 2\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$ , образующаяся при этом вода испаряется и удаляется из печи.

3. При 910 °С происходит диссоциация известняка по реакции

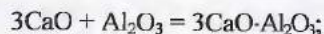


4. Образующийся углекислый газ вместе с продуктами горения удаляется из печи, а  $\text{CaO}$  вступает в химическое взаимодействие с продуктами распада каолинита при температуре 1200 °С. При этом последовательно образуются следующие химические соединения:

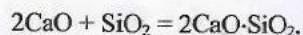
четырекальциевый алюмоферрит:



трехкальциевый алюминат:

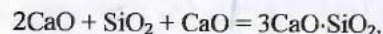


двухкальциевый силикат:



При температуре порядка 1300 °С эти реакции заканчиваются и обжиговая масса состоит полностью из указанных минералов, а также избытка свободной извести  $\text{CaO}$ .

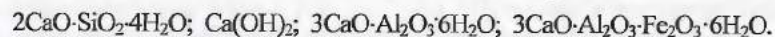
5. При температуре свыше 1300 °С четырехкальциевый алюмоферрит и трехкальциевый алюминат расплавляются и образуют жидкость, в которой двухкальциевый силикат и оксид кальция, частично растворяясь, реагируют по схеме



В результате реакции образуется трехкальциевый силикат.

Максимальная температура обжига достигает 1450–1500 °С. При этом материал спекается, образуя клинкер в виде кусочков размером 4–30 мм, который охлаждают в специальном холодильнике (в целях обеспечения лучшего качества цемента).

После затворения цемента водой происходит вначале растворение клинкерных минералов с последующим образованием гидратных соединений:



Добавка двухводного гипса замедляет схватывание теста за счет образования труднорастворимого гидросульфаталюмината кальция  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .

За периодом схватывания следует период твердения с постепенным нарастанием прочности, продолжающийся длительное время (годами).

В твердеющем цементном камне различают три основные структуры:

– кристаллический сросток, состоящий из кристаллогидроксидов: гидросульфаталюмината кальция, гидроксида кальция и гидроалюминатов кальция;

– гель (аморфная масса), образованный субмикрочастицами гидросиликатов кальция, удерживающими межплоскостную и приточную воду (адсорбционную);

– не до конца гидратированные зерна исходного цемента.

Дальнейший рост прочности цементного камня обусловлен в некоторой степени карбонизацией его поверхностных слоев, происходящей под действием углекислого газа из воздуха на  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Механические свойства портландцемента характеризуются временным сопротивлением сжатию и изгибу образцов-балочек  $4 \times 4 \times 16$  см из пластичного раствора, состоящего из цемента и песка в соотношении 1:3, при водоцементном отношении 0,4 для возраста 28 сут. Объемная масса цемента в рыхлом состоянии – 1100–1900 кг/м<sup>3</sup>.

В настоящее время портландцемент широко применяют для производства бетонных и железобетонных конструкций, а также строительных растворов и асбестоцемента.

### 3.2.2. Бетон

Бетон – искусственный каменный материал, получаемый в результате затвердевания смеси вяжущего вещества, воды и заполнителя (мелкого – кварцевого песка и крупного – из горных пород либо отходов промышленности).

Бетоны классифицируются по ряду признаков:

- по основному назначению – конструкционные, специальные;
- виду вяжущего – на основе цементных, силикатных, шлаковых и других вяжущих;
- виду заполнителей – на плотных, пористых, специальных заполнителях;
- структуре – плотная, крупнопористая, поризованная, ячеистая.

Существуют также специальные виды бетонов:

- жаростойкие – предназначены для использования в конструкциях, эксплуатирующихся при  $t > 200\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- химически стойкие, используемые в условиях агрессивных сред;
- напрягающие (на основе напрягающего цемента) – предназначены для создания предварительного напряжения в конструкциях;
- радиационно-защитные большой массы, применяемые для биологической защиты от излучений;
- бетонополимеры, представляющие собой обычные бетоны, пропитанные полимерами или мономерами;
- полимербетоны (рис. 3.6), в которых в качестве связующего используют полимеры, обладающие повышенной прочностью, особенно на растяжение, высокой химической стойкостью и т. п.



Рис. 3.6. Сочетание бетона и полимеров – полимербетоны

По средней плотности  $D$  бетоны классифицируются на:

- особо тяжелые – со средней плотностью более  $2500\text{ кг/м}^3$ ;
- тяжелые – со средней плотностью  $2200\text{--}2500\text{ кг/м}^3$ ;
- облегченные – со средней плотностью  $1800\text{--}2200\text{ кг/м}^3$ ;
- легкие – со средней плотностью  $500\text{--}1800\text{ кг/м}^3$ .

Прочность бетона зависит от ряда факторов, основными из которых являются: время и условия твердения, вид напряженного состояния, формы и размеры образцов, длительность нагружения.

Классом бетона по прочности на осевое сжатие  $B$ , МПа, называется временное сопротивление сжатию бетонных кубов с размером ребра  $150\text{ мм}$ , испытанных через  $28$  дней хранения при температуре  $(20\pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$  по ГОСТу с учетом статической изменчивости прочности.

Кубиковая прочность  $R$  – временное сопротивление сжатию бетонных кубов с размером ребра  $150\text{ мм}$ . Чем меньше размер куба, тем больше его прочность. Прочность для куба с ребром  $100\text{ мм}$  –  $1,12R$ , для куба с ребром  $200\text{ мм}$  –  $0,93R$ .

Основной характеристикой прочности бетона сжатых элементов является призмная прочность  $R_b$  – временное сопротивление осевому сжатию бетонных призм, имеющих высоту  $600\text{ мм}$  и размер сторон основания  $150\times 150\text{ мм}$ .

Класс бетона по прочности на осевое растяжение  $B_t$  устанавливают для конструкций, работающих преимущественно на растяжение (резервуары, водонапорные трубы и т. п.).

Показателями качества бетона также являются:

- проектные марки по морозостойкости  $F50\text{--}F500$ ;
- марки по водонепроницаемости  $W2\text{--}W12$ ;
- марки по самонапряжению  $S_p$ .

Среднее значение коэффициента теплопроводности тяжелых бетонов  $\lambda = 1,7\text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$ , легких и ячеистых –  $\lambda = 0,16\text{--}0,64\text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$ .

Бетон применяют при производстве сборных и монолитных железобетонных конструкций (рис. 3.7).



Рис. 3.7. Общий вид железобетонных плит

### 3.2.3. Асбестоцемент

Асбестоцемент используют для изделий в основном плоских, волнистых прессованных и непрессованных листов и труб (рис. 3.8).



Рис. 3.8. Общий вид асбестоцементных труб

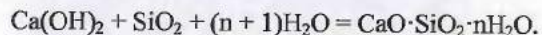
В состав асбестоцемента входит асбест в пределах 10–20 % (масс.), портландцемент – 80–90 % и большое количество воды. Изделия изготовляют на специальной листоформовочной машине, обеспечивающей слоистую структуру изделий и постепенное непрерывное их уплотнение. Благодаря такой обработке изделия обладают в 10–20 раз выше прочностью при изгибе, чем цементный камень (30–50 МПа).

Листы применяют в основном для изготовления слоистых ограждающих конструкций, перегородок, кровли.

#### 3.2.4. Силикатные материалы автоклавного твердения

Учитывая, что при твердении на воздухе воздушная известь приобретает малую прочность и легко разрушается под действием воды, в вяжущее добавляют кварцевый песок и твердение его осуществляют в автоклаве (герметичном сосуде) при температуре свыше 170 °С, избыточном давлении более 0,8 МПа и 100 % влажности воздуха.

При этом идет реакция:



В результате получают гидросиликат кальция – прочное и водостойкое вещество. На силикатном связующем изготовляют силикатобетон (рис. 3.9), силикатный кирпич и другие материалы, которые по прочности практически не уступают бетону на портландцементе и керамическому (глиняному обыкновенному) кирпичу соответственно.



Рис. 3.9. Автоклавный силикатный бетон в строительстве

#### 3.2.5. Керамические материалы и минеральные расплавы

Керамические материалы получают путем обжига глин до температур 900–1300 °С. В процессе обжига происходят физико-химические процессы,

приводящие к упрочению материала. Основным материалом, применяемым в строительстве, являются кирпич глиняный обыкновенный (рис. 3.10) – применяют для кладки вертикальных строительных конструкций, керамические плитки – для полов и кровли, фарфор и фаянс – для сантехнических изделий.



Рис. 3.10. Образцы глиняного кирпича обыкновенного

Минеральные расплавы получают путем нагрева природных каменных материалов до температуры плавления и последующего остывания (в форме). Так получают кварцевое стекло, стекловату (путем продувки расплавленной массы горячим воздухом), минеральную вату. Керамические материалы обладают высокой прочностью и долговечностью (рис. 3.11).



Рис. 3.11. Дренажные керамические трубы

### 3.3. Общие закономерности и специфические особенности поведения каменных материалов в условиях пожара

Изучением поведения каменных материалов в условиях пожара занимались в течение нескольких десятилетий многие отечественные исследователи. На основе анализа и обобщения результатов исследований К. Д. Некрасова, А. Ф. Милованова, В. В. Жукова, М. Я. Ройтмана,

Н. И. Зенкова, В. М. Ройтмана, Е. А. Мешалкина можно выявить общие закономерности поведения каменных материалов в условиях пожара (см. рис. 3.1, который является частным случаем общей схемы, показанной на рис. 1.1). Согласно этой схеме на влажный капиллярно-пористый каменный материал (характеризуемый внутренними факторами), находящийся в условиях эксплуатации в течение определенного времени (под негативным воздействием внешних эксплуатационных факторов), действуют агрессивные факторы пожара. В результате их действия в материале происходят негативные процессы, приводящие к отрицательным последствиям. Характер поведения каменных материалов в условиях пожара в принципе одинаков для всех материалов, отличаются лишь количественные показатели. Специфические особенности обусловлены действием лишь внутренних факторов, присущих анализируемому материалу (при анализе поведения материалов в идентичных условиях действия внешних факторов). Рассмотрим характерные особенности, присущие поведению охарактеризованных в разд. 3.1, 3.2 видов материалов в условиях пожара.

### 3.3.1. Особенности поведения природных каменных материалов в условиях пожара

Мономинеральные горные породы (гипс, известняк, мрамор и др.) при нагреве ведут себя более спокойно, чем полиминеральные. Они претерпевают в начале свободное тепловое расширение, освобождаясь от физически связанной влаги в порах материала. Это не приводит, как правило, к снижению прочности и даже может наблюдаться ее рост при спокойном удалении свободной влаги. Затем в результате действия химических процессов дегидратации (если материал содержит химически связанную влагу) и диссоциации материал претерпевает постепенное разрушение (снижение прочности практически до нуля).

Полиминеральные горные породы ведут себя в основном аналогично мономинеральным, за исключением того, что при нагреве возникают значительные напряжения, обусловленные различными величинами коэффициентов теплового расширения у компонентов, входящих в состав горной породы. Это приводит к разрушению (снижению прочности) материала. Проиллюстрируем особенности поведения мономинеральных и полиминеральных горных пород при нагреве на примере двух материалов: известняка и гранита.

**Известняк** – мономинеральная горная порода, состоящая из минерала кальцита  $\text{CaCO}_3$ . Нагревание кальцита до  $600^\circ\text{C}$  не вызывает значительных изменений минерала, а сопровождается лишь его равномерным расширением. Выше  $600^\circ\text{C}$  (теоретическая температура  $910^\circ\text{C}$ ) начинается диссоциация кальцита по реакции  $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$ , в результате которой образуется углекислый газ (до 44 % (масс.) от исходного материала) и рыхлый низкопрочный оксид кальция, что вызывает необратимое снижение прочности известняка. При испытании материала при нагреве,

а также после нагрева и остывания в ненагруженном состоянии Н. И. Зенковым [14] было установлено, что при нагревании известняка до  $600^\circ\text{C}$  происходит увеличение его прочности на 78 % в связи с удалением физически связанной (свободной) влаги из микропор материала. Затем прочность снижается: при  $800^\circ\text{C}$  она достигает первоначальной, а при  $1000^\circ\text{C}$  прочность составляет всего 20 % от начальной (до нагрева, рис. 3.12).

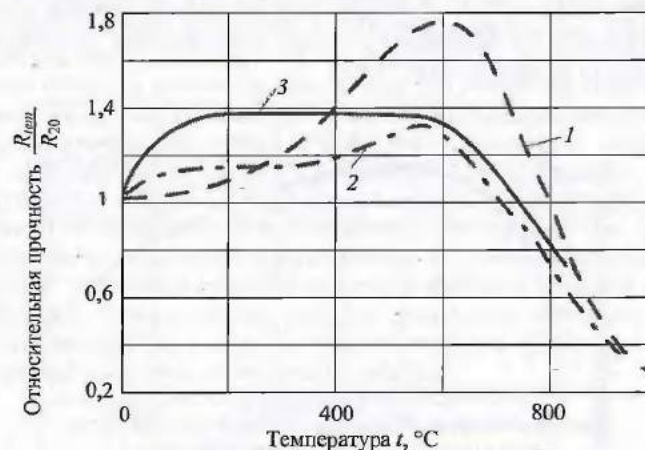
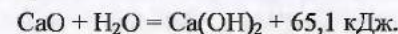


Рис. 3.12. Изменение относительной прочности известняка при нагревании в ненагруженном состоянии: 1 – в горячем состоянии; 2 – после остывания; 3 – изменения прочности известняка после нагрева и остывания (данные М. Я. Ройтмана)

Следует иметь в виду, что в процессе охлаждения большинства материалов после высокотемпературного нагрева продолжается изменение (чаще – снижение) прочности. Снижение прочности известняка до первоначальной происходит после нагрева до  $700^\circ\text{C}$  с последующим остыванием (в горячем состоянии до  $800^\circ\text{C}$ ).

Поскольку процесс диссоциации  $\text{CaCO}_3$  протекает со значительным поглощением тепла ( $178,5$  кДж/кг) и образующийся при этом пористый оксид кальция обладает малой теплопроводностью, слой  $\text{CaO}$  создает на поверхности материала теплозащитный барьер, несколько замедляющий дальнейший прогрев известняка вглубь.

При контакте с водой при тушении пожара (либо влагой из воздуха после остывания материала) происходит повторно реакция гидратации образовавшейся при высокотемпературном нагреве негашеной извести  $\text{CaO}$ . Причем эта реакция протекает с остывшей известью:



Образующийся при этом гидроксид кальция увеличивается в объеме и является очень рыхлым и непрочным материалом, который легко разрушается.

Рассмотрим теперь поведение гранита при нагревании. Поскольку гранит – полиминеральная горная порода, состоящая из полевого шпата, кварца и слюды, его поведение в условиях пожара будет во многом определяться поведением этих компонентов. Установлено, что график зависимости коэффициента изменения прочности гранита от температуры можно условно разделить на несколько участков, отражающих характер происходящих в граните процессов (рис. 3.13).

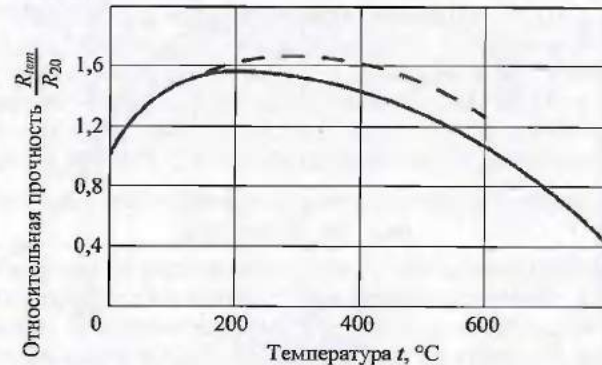


Рис. 3.13. Изменение относительной прочности гранита после нагрева до заданных температур в ненагруженном состоянии и последующего остывания: --- – после одночасового нагрева; – после восьмичасового нагрева [7]

1. После нагревания гранита до 200 °C и последующего остывания наблюдается увеличение прочности на 60 %, связанное со снятием внутренних напряжений, возникших в период образования гранита в результате неравномерного охлаждения расплавленной магмы, и разницы величины коэффициентов температурного расширения минералов, составляющих гранит. Кроме того, увеличение прочности в некоторой степени, видимо, также обусловлено удалением свободной влаги из микропор гранита.

2. При температуре выше 200 °C начинается постепенное снижение прочности, которое объясняется возникновением новых внутренних напряжений, связанных с различием коэффициентов термического расширения минералов.

3. Уже значительное снижение прочности гранита наступает выше 575 °C из-за изменения объема кварца, претерпевающего модификационное превращение (β-кварца в α-кварц). При этом в граните невооруженным глазом можно обнаружить образование трещин. Однако суммарная прочность гранита в рассмотренном температурном интервале еще остается высокой: при 630 °C предел прочности гранита равен начальному значению.

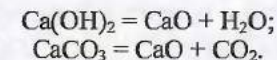
4. В диапазоне температур 750–800 °C и выше продолжается снижение прочности гранита за счет дегидратации и диссоциации минералов полевого шпата и слюды, а также модификационного превращения кварца из α-кварца в α-тридимит при 870 °C. При этом в граните образуются более глубокие трещины. Предел прочности гранита при 800 °C составляет всего 35 % от первоначального значения. Установлено, что скорость прогрева оказывает влияние на изменение прочности гранита. Так, при быстром (одночасовом) нагреве прочность его начинает снижаться после 200 °C, в то время как после медленного (восьмичасового) – лишь с 350 °C.

Таким образом, можно сделать вывод, что известняк (мономинеральная горная порода) является более стойким к нагреванию материалом, чем гранит (полиминеральная порода). Известняк практически полностью сохраняет свою прочность после нагревания до 700 °C, гранит – до 630 °C и последующего остывания. Кроме того, известняк претерпевает значительно меньшее температурное расширение, чем гранит. Это важно учитывать при оценке поведения искусственных каменных материалов в условиях пожара, в которые гранит и известняк входят в качестве заполнителей, например, бетона. Также следует учитывать, что после прогрева до высоких температур и последующего остывания природных каменных материалов их прочность не восстанавливается.

### 3.3.2. Особенности поведения неорганических вязких веществ при нагревании

При пожаре в неорганических вязких веществах происходят в основном те же процессы, которые имели место при их получении из исходного сырья (природных каменных материалов) путем варки либо обжига при высоких температурах. Эти процессы приводят в итоге к снижению прочности в результате разрушения материалов [7].

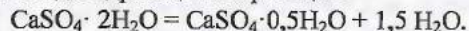
Как известно, известь в чистом виде в строительстве не применяют. Однако чтобы лучше понять, как будут вести себя в условиях пожара материалы на основе извести, рассмотрим поведение при нагревании чистого известкового камня. При его нагреве происходят следующие процессы: удаление свободной воды (до температуры 150–200 °C) приводит к некоторому повышению прочности; дегидратация гидроксида кальция при 430–580 °C; диссоциация карбоната кальция (выше 600 °C) приводит к ее снижению:



Образование при этом поверхностного слоя из оксида кальция, обладающего более низкой теплопроводностью, чем CaCO<sub>3</sub>, несколько задерживает прогрев известкового камня и замедляет снижение прочности. Однако вторичное гашение CaO в период охлаждения при соединении его с влагой воздуха и при тушении пожара водой является причиной интенсивного растрескивания известкового камня и приводит к полной потере прочности.

При анализе поведения в условиях пожара материалов и изделий на основе воздушной извести необходимо учитывать влияние других компонентов, в частности, кварцевого песка. Изменяя модификацию кварца при 575 °С, кварцевый песок расширяется (+2,4 %), а известковый камень претерпевает усадку. Это ведет к возникновению внутренних напряжений и к снижению прочности.

У затвердевшего гипсового вяжущего при нагреве выше 65 °С уже начинается процесс его дегидратации по реакции:



Прочность при этом снижается более чем в 2 раза (рис. 3.14).

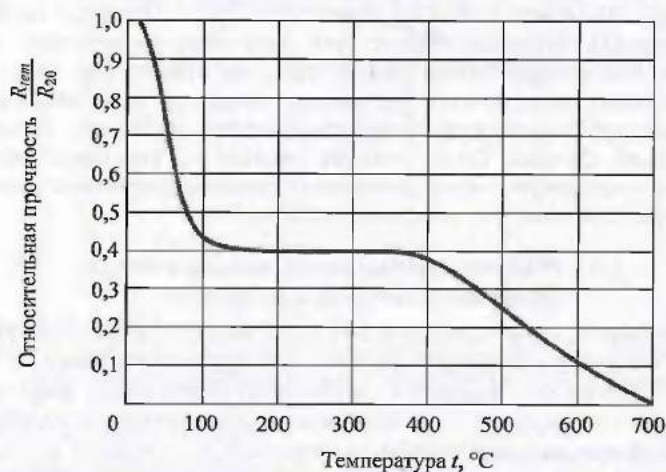
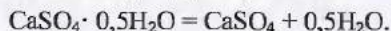


Рис. 3.14. Изменение относительной прочности гипсового камня при нагревании в ненагруженном состоянии [14]

Около 400 °С заканчивается дегидратация гипса:



Прочность теряется практически полностью. При температуре выше 900 °С распадается ангидрид по реакции диссоциации:



что снижает прочность гипса до нуля.

При нагреве портландцементного камня до 100–150 °С прочность может несколько снижаться, так как нагревающаяся в порах материала вода расширяется и оказывает дополнительное давление на их стенки, что приводит к возникновению внутренних напряжений в материале, снижающих его прочность (рис. 3.15).

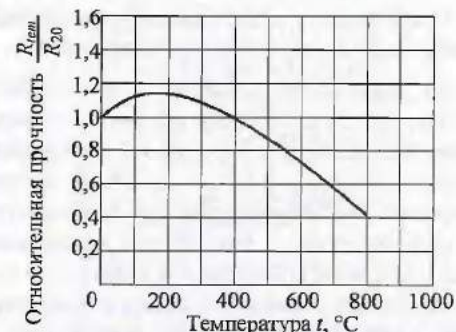


Рис. 3.15. Изменение относительной прочности сухого портландцементного камня при нагревании в ненагруженном состоянии [7, 9, 10]

При 200–300 °С (см. рис. 3.15) прочность несколько увеличивается благодаря уплотнению структуры, вследствие удаления свободной воды из пор геля двухкальциевого силиката и в результате ускоренного завершения кристаллизации гидроксида кальция (см. рис. 3.15). Выше 200–300 °С происходит накопление дефектов структуры, т. к. деформации гелеобразной части цементного камня и непрореагировавших с водой зерен портландцемента неодинаковы по знаку. Поэтому прочность камня начинает снижаться. С 240 °С также начинается процесс дегидратации трехкальциевого гидроалюмината ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), а при 490–580 °С – гидроксида кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Дегидратация клинкерных минералов портландцемента происходит в диапазоне 240–1000 °С, что приводит к снижению прочности затвердевшего портландцементного камня.

На рис. 3.16 отражена деформативность цементного камня при нагреве. До 300 °С он претерпевает положительные деформации, что можно объяснить температурным расширением, а до 100–150 °С – и расширением влаги в его порах. Затем материал претерпевает усадку (отрицательные деформации – сжатия) из-за удаления видов влаги из цементного камня.

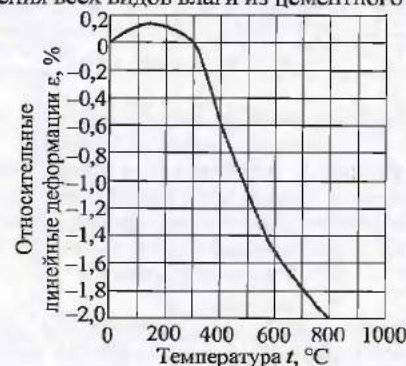


Рис. 3.16. Изменение относительной деформации цементного камня при нагревании в ненагруженном состоянии [7]



### 3.3.3. Особенности поведения искусственных каменных материалов при нагревании

Поскольку бетон является композиционным материалом, его поведение при нагреве зависит от поведения цементного камня, заполнителя и их взаимодействия. Выше были рассмотрены в отдельности поведение при нагреве цементного камня, природных каменных материалов, осталось лишь добавить особенности взаимодействия компонентов бетона при нагреве. Одна из особенностей – химическое соединение при нагреве до 200 °С гидроксида кальция с кремнеземом кварцевого песка (этому способствуют условия, аналогичные тем, что создают в автоклаве для быстрого твердения бетона: повышенное давление, температура, влажность воздуха). В результате такого соединения образуется дополнительное количество гидросиликатов кальция. Кроме того, при этих же условиях происходит дополнительная гидратация клинкерных минералов цементного камня. Все это способствует некоторому повышению прочности (рис. 3.17, а, кривая 1).

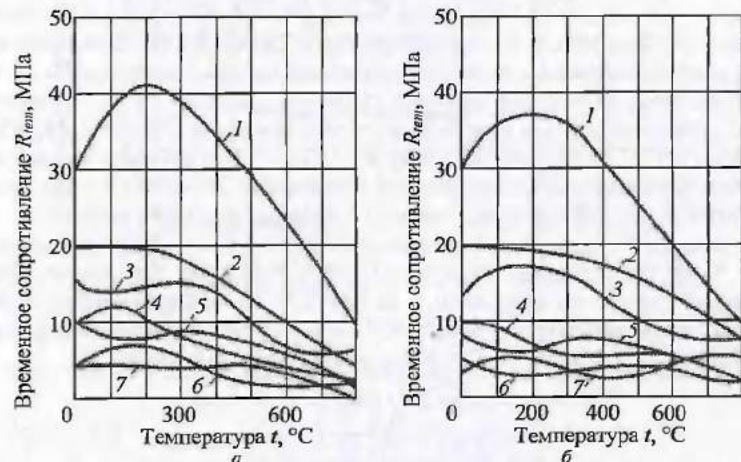


Рис. 3.17. Изменение временного сопротивления сжатию различных видов бетона в нагретом состоянии:

- а – без нагрузки; б – после нагрева и остывания без нагрузки;  
 1 – тяжелый бетон; 2 – легкий бетон с заполнителем из шлаковой пемзы;  
 3 – легкий бетон с заполнителем из керамзитового гравия; 4 – перлитобетон;  
 5 – газозобетон; 6 – пенокерамзитобетон; 7 – пенобетон с заполнителем из шлаковой пемзы [7]

При нагреве бетона выше 200 °С возникают противоположно направленные деформации претерпевающего усадку вяжущего и расширяющегося заполнителя, что снижает прочность бетона (рис. 3.18) наряду с деструктивными процессами, происходящими в вяжущем и заполнителе.

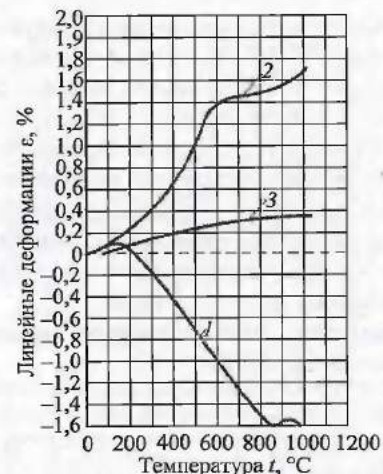


Рис. 3.18. Изменение относительных деформаций компонентов бетона при нагревании в ненагруженном состоянии:

- 1 – вяжущего цементного камня; 2 – тяжелого заполнителя – гранита, кварцевого песка, песчаника;  
 3 – легкого заполнителя – шамота, доменного шлака [7]

Расширяющаяся влага при температурах от 20 до 100 °С давит на стенки пор, и фазовый переход воды в пар также повышает давление в порах бетона, что приводит к возникновению напряженного состояния, снижающего прочность.

По мере удаления свободной воды прочность бетона может возрастать (рис. 3.19).

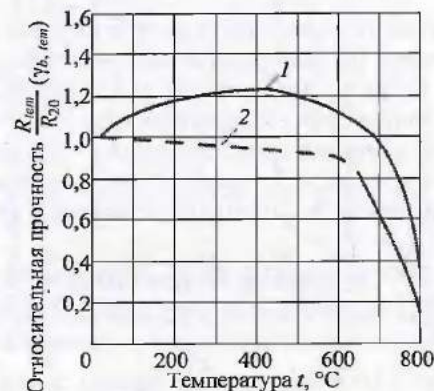


Рис. 3.19. Изменение относительной прочности бетона на портландцементе при нагреве в ненагруженном состоянии:

- 1 – испытание при равновесном начальном влажесодержании;  
 2 – испытание после сушки при 105–110 °С до постоянной массы [7, 9, 10]

При прогреве образцов бетона, заранее высушенных в сушильном шкафу при температуре 105–110 °С до постоянной массы, физически связанная вода отсутствует, поэтому такого резкого снижения прочности в начале нагрева не наблюдается (см. рис. 3.19).

При остывании бетонов после нагрева прочность, как правило, практически соответствует прочности при той максимальной температуре, до которой образцы были нагреты. У отдельных видов бетона она несколько снижается при остывании за счет более длительного нахождения материала в нагретом состоянии, что способствовало более глубокому протеканию в нем негативных процессов (см. рис. 3.17, б).

Деформативность бетона по мере прогрева увеличивается за счет увеличения его пластичности (рис. 3.20).

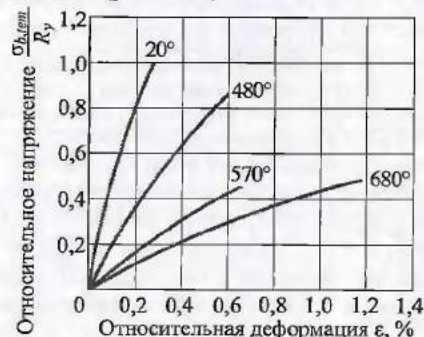


Рис. 3.20. Деформации тяжелого бетона В60 при нагреве до различных температур в ненапряженном состоянии [7, 9, 10]

Мы рассмотрели изменение прочности бетона при нагревании в ненагруженном состоянии, что нехарактерно для работы несущих конструкций. Поэтому начиная с 70-х гг. прошлого века во ВНИИПО МЧС России проводят испытания при нагреве нагруженных образцов бетона. При этом измеряют величины относительных суммарных деформаций (свободного расширения и сжатия под действием внешней нагрузки) и температуру (критическую), при которой происходит разрушение (утрата целостности) образца.

На рис. 3.21 показан характер роста деформаций по мере нагрева образцов бетона при различных величинах относительных напряжений от внешней нагрузки:

$$\gamma_{b,tem} = \frac{\sigma_{b,tem}}{R_{20}}, \quad (3.1)$$

где  $\sigma_{b,tem}$  — напряжение от внешней нагрузки, МПа;

$R_{20}$  — временное сопротивление бетона сжатию при температуре 20 °С, МПа.

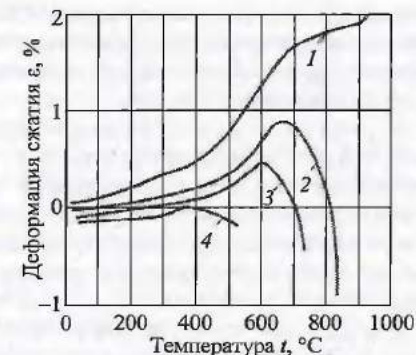


Рис. 3.21. Изменение относительных деформаций тяжелого бетона В30 с гранитным заполнителем при нагреве в нагруженном состоянии:  
1 —  $\gamma_b = 0,2$ ; 2 —  $\gamma_b = 0,3$ ; 3 —  $\gamma_b = 0,5$ ; 4 —  $\gamma_b = 0,8$

Как видно на рис. 3.21, по мере повышения нагрузки уменьшаются деформации расширения и увеличиваются деформации сжатия, а разрушение (утрата целостности) образцов происходит при меньших температурах и деформациях, чем при малых нагрузках.

По результатам таких испытаний строят графики зависимости температуры (критической), при которой произошла утрата целостности образца, от величины относительной нагрузки на него при огневом испытании. Строят их так, как показано на рис. 3.22, называя величину  $\gamma_{b,tem}$  относительной прочностью либо коэффициентом изменения прочности бетона при нагреве.



Рис. 3.22. Изменение относительной прочности тяжелого бетона класса В30 по прочности с гранитным заполнителем при нагреве в нагруженном состоянии [7, 9, 10]

Эта величина всегда меньше единицы (по физическому смыслу — относительное напряжение от внешней нагрузки). Методика таких испытаний не позволяет зафиксировать увеличение прочности материала в начале нагрева, даже если оно и имеет место. Так, на рис. 3.22 по результатам

опытов построен график в диапазоне температур от 550 до 820 °С, так как величина относительного напряжения  $\gamma_{b,tem}$  в опытах изменялась в интервале от 0,3 до 0,7. Участок  $\gamma_{b,tem}$  от 0,7 до 1 соединен произвольно (экстраполирован) гипотетической пунктирной линией.

Из рис. 3.22 видно, чем выше относительная нагрузка на образец, тем при меньшей критической температуре он разрушится. По этой зависимости исследователи делают вывод, что с увеличением температуры прочность бетона падает при испытании в напряженном состоянии.

Кроме того, строительные конструкции из тяжелого бетона (железобетона) склонны к взрывообразному разрушению при пожаре. Это явление наблюдается у конструкций, материал которых имеет влагосодержание выше критической величины при интенсивном подъеме температуры при пожаре. Чем плотнее бетон, тем ниже его паропроницаемость, больше микропор, тем он более склонен к возникновению такого явления, несмотря на более высокую прочность. Легкие и ячеистые бетоны с объемной массой ниже 1200 кг/м<sup>3</sup> не склонны к взрывообразному разрушению.

Спецификой поведения легких и ячеистых бетонов, в отличие от поведения тяжелых бетонов при пожаре, является более длительное время прогрева вследствие их низкой теплопроводности.

Поведение силикатных материалов в условиях пожара зависит от поведения известково-силикатного вяжущего, заполнителей и их взаимодействия при нагреве. В принципе оно аналогично поведению бетона на портландцементе (рис. 3.23).

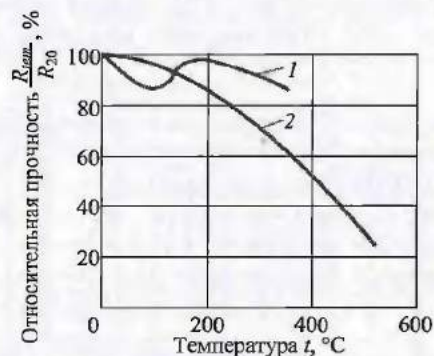


Рис. 3.23. Изменение относительной прочности силикатобетона при нагреве: 1 – в ненагруженном состоянии; 2 – в нагруженном состоянии [7, 9, 10]

Отличие состоит в том, что реакции дегидратации подвергаются два компонента  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , в то время как у портландцементного вяжущего несколько компонентов. Конструкции из силикатных материалов, в частности тяжелого силикатного бетона, более склонны к явлению взрывообразной потери целостности в условиях пожара, чем из бетона на портландцементе.

Поведение асбестоцемента при нагреве определяется поведением цементного камня (матрицы) и асбеста (заполнителя арматуры). Графики изменения их прочности при нагреве качественно аналогичны. Асбест, как и цемент, при нагреве теряет химически связанную воду и постепенно снижает прочность (рис. 3.24).

В итоге асбестоцемент изменяет прочность, как показано на рис. 3.25. На специфический характер поведения в условиях пожара оказывает влияние анизотропность структуры асбестоцементных изделий, так как при формовании эти изделия имеют явно выраженную слоистость по толщине. Прочность сцепления между слоями значительно ниже прочности материала в каждом слое. То есть материал при разрушении может расслаиваться как спокойно, так и взрывообразно.

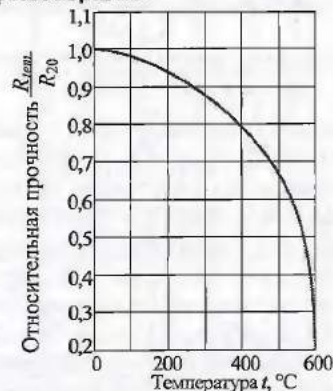


Рис. 3.24. Изменение относительной прочности силикатобетона после нагрева и остывания [14]

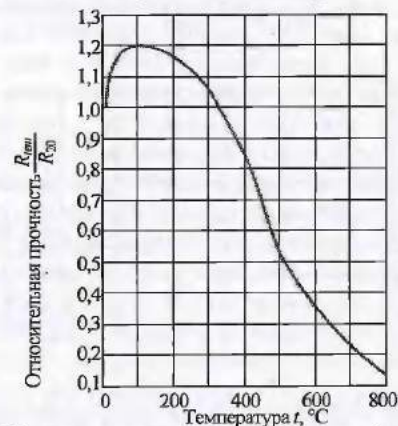


Рис. 3.25. Изменение относительной прочности (при изгибе) асбестоцемента при нагреве [14]

Причем склонность к взрывообразной потере целостности асбестоцемента увеличивается с повышением его начального влагосодержания, количества микропор, при снижении паропроницаемости за счет увеличения средней плотности, несмотря на рост прочности, т. е. аналогично тяжелым бетонам. Экспериментальные исследования показали, что теплофизические характеристики асбестоцемента изменяются при нагреве (рис. 3.26) не по линейному закону.

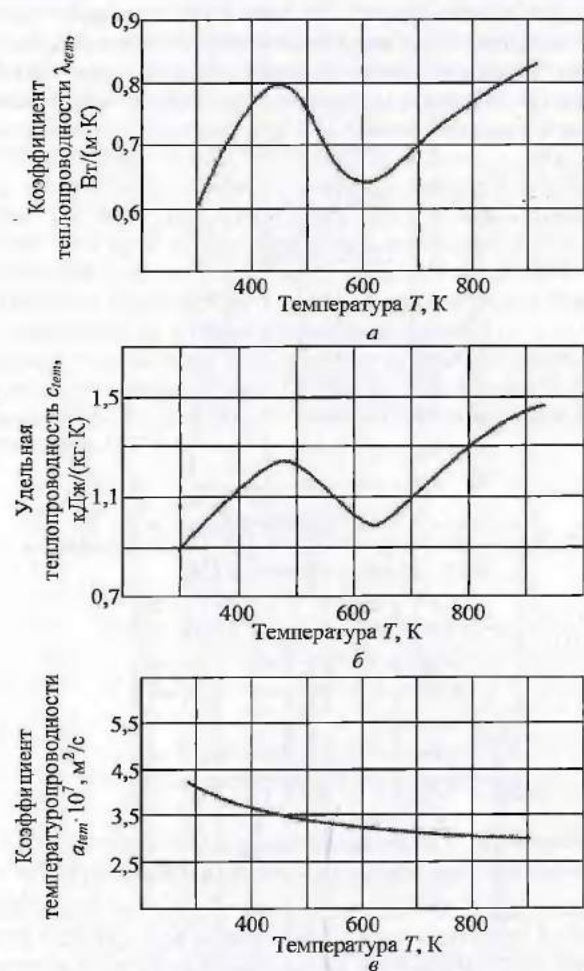


Рис. 3.26. Изменение теплофизических характеристик: коэффициента теплопроводности (а), удельной теплоемкости (б) асбестоцемента, коэффициента температуропроводности (в) при нагреве [7, 9, 10]

Прочностные свойства керамических материалов и минеральных расплавов в условиях пожара практически не изменяются. Для керамических материалов нагрев без существенного изменения прочности возможен до температуры обжига 950–1300 °С. Для минеральных расплавов предельная температура применения близка к их температуре плавления. Эти температуры, как правило, не достигаются при пожарах. Такое поведение данной группы материалов в условиях пожара обусловлено тем, что все процессы (химические) произошли с ними при первом нагреве (при их получении), а при повторном нагреве имеют место лишь физические процессы (температурные деформации и удаление капиллярной влаги). При интенсивном нагреве плотные керамические изделия (например, кровельные плитки) могут претерпевать взрывообразную потерю целостности.

#### 3.4. Способы повышения стойкости каменных материалов к воздействию пожара

Как было отмечено в п. 3.3, каменные материалы не горят в условиях пожара, но одни более, другие менее существенно снижают прочность. Поэтому в зависимости от области их применения в строительстве осуществляют подбор природных и изготовление искусственных каменных материалов с необходимыми свойствами. Так, при выборе материалов-заполнителей для изготовления несущих конструкций из тяжелого бетона из природных каменных материалов предпочтение отдают известняку, а не граниту, так как последний несколько хуже ведет себя в условиях пожара. При этом в качестве вяжущего лучше себя ведет порландцемент по сравнению со строительным гипсом или известью. Причем стойкость порландцемента к воздействию пожара повышается с увеличением в нем содержания трехкальциевого силиката (алита) –  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ .

Из искусственных каменных материалов лучше ведут себя в условиях пожара те, которые уже претерпели высокотемпературный нагрев (обжиг) при изготовлении – это керамические материалы, минеральные расплавы. При их нагреве в процессе изготовления уже произошли все химические процессы, которые в основном приводят к снижению прочности каменных материалов в условиях пожара. Поэтому при повторном нагреве этих материалов в условиях пожара они подвергаются воздействию лишь физических процессов, менее агрессивных, чем химических, что не приводит к существенному изменению их прочности. При пожаре температуры нагрева этих материалов, как правило, не достигают температуры их обжига, которые имеют место при изготовлении. Учитывая, что каменные материалы обладают повышенной стойкостью к воздействию пожара, по сравнению с металлами, органическими материалами, специальные меры по повышению их стойкости, как правило, не предусматривают. Более того, каменные материалы применяют в качестве огнезащиты органических материалов.

#### 4. Металлы, сплавы, их поведение в условиях пожара и способы повышения стойкости к его воздействию

В строительстве чистые металлы применяют довольно редко, более распространены сплавы. В первую очередь сплавы железа с углеродом – стали и всевозможные алюминиевые сплавы. Для того чтобы понять, как ведут себя в условиях пожара металлические сплавы, применяемые в строительстве, а также как прогнозировать и регулировать их поведение, воспользуемся схемой. Применительно к металлическим сплавам она выглядит так, как изображено на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Структурная схема-ключ к изучению, оценке, прогнозированию, регулированию поведения металлических сплавов в условиях пожара и определению области их безопасного применения в строительстве

#### 4.1. Особенности состава, строения и свойств строительных сталей и алюминиевых сплавов

Главной особенностью чистых металлов и сплавов является кристалличность структуры. В расплавленном состоянии атомы металлов находятся в беспорядочном движении, а при переходе в твердое состояние они ориентируются определенным образом в пространстве, образуя кристаллическую решетку. Строение решетки и расположение в ней атомов зависят от вида металла. Наиболее распространенными типами кристаллической решетки являются кубическая – у железа и гексагональная – у алюминия (рис. 4.2).

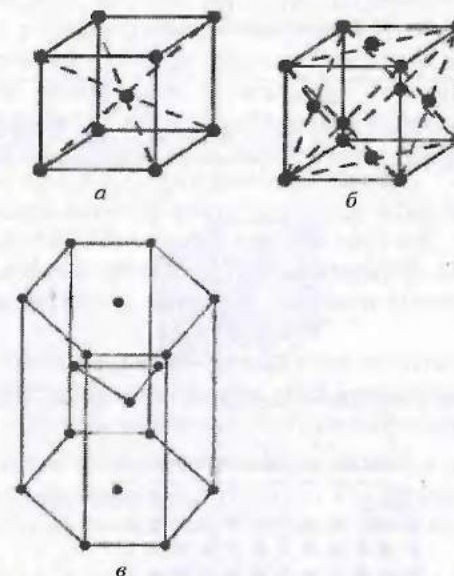


Рис. 4.2. Виды простейших кристаллических решеток:  
а – кубическая объемно-центрированная; б – кубическая гранецентрированная;  
в – гексагональная плотноупакованная

Некоторые металлы, например железо, могут иметь различные типы кристаллической решетки (гранецентрированную и объемно-центрированный куб). Такое явление называют полиморфностью. А способность при определенных температурах перестраивать свою кристаллическую решетку, изменяя ее тип, называют модификационными или аллотропическими превращениями (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Графическая зависимость изменения температуры от времени охлаждения для чистого железа (диаграмма аллотропических превращений чистого железа)

Рассмотренные виды кристаллических решеток характерны для идеальных кристаллов. Для реальных металлов и сплавов характерно наличие различных дефектов. Дефекты бывают точечные, линейные и поверхностные. К самым простым точечным дефектам относятся вакансии и межузельные атомы.

Вакансией называется пустой узел кристаллической решетки. Межузельным атомом называется атом, перемещенный из узла в позицию между узлами (рис. 4.4).



Рис. 4.4. Точечные дефекты в кристалле

Вакансии и межузельные атомы имеются в кристаллах при любой температуре выше абсолютного нуля из-за тепловых колебаний атомов.

К линейным дефектам относятся краевая и винтовая дислокации. Дислокации образуются за счет нарушения правильного чередования атомных плоскостей при кристаллизации, а также в результате слияния большого числа вакансий. Поверхностные дефекты образуются в более крупных структурах металла, например, на границе зерен, т. е. групп кристаллов, которые могут быть ориентированы в пространстве различным образом.

Все физико-механические свойства металлов и их особенности являются следствием кристаллической структуры. Высокая прочность металлов объясняется наличием сил, удерживающих атомы в определенных местах кристаллической решетки. По мере увеличения числа дефектов прочность металла снижается до определенного значения, а затем снова может начать возрастать за счет явления наклепа.

В основе упругих деформаций лежит обратимое смещение атомов кристаллической решетки от положения равновесия. В основе пластического деформирования металлов лежит перемещение дислокаций практически при любых температурах и нагрузках. Сущностью пластического деформирования является сдвиг, в результате которого одна часть кристалла смещается по отношению к другой части. Такое смещение в идеальном кристалле происходит по плоскости (рис. 4.5).

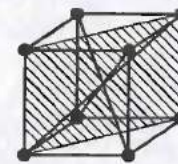


Рис. 4.5. Пример расположения одной из плоскостей скольжения в объемно-центрированной кубической решетке

В металлах сдвиг происходит за счет скольжения дислокаций. Значительные пластические деформации приводят в конечном счете к разрушению металла. Хрупкое разрушение наступает без видимых пластических деформаций.

Наличие точечных дефектов и микровключений мешает продвижению дислокаций. Кроме того, помехой для движения дислокаций служат элементы пластически деформированных кристаллических решеток. Этим объясняется явление наклепа, т. е. самоупрочнения металлов в результате пластической деформации.

#### 4.1.1. Стали, применяемые в строительстве

Сталями называют сплавы железа (рис. 4.6) и углерода. Содержание углерода в сталях не превышает 2 %. При содержании углерода более 2 % сплав называют чугуном.

Сталь получают в конверторных или мартеновских печах путем продувки кислородом расплавленного чугуна. В результате продувки происходит окисление различных добавок и части углерода, содержащихся в чугуне. После плавки сталь разливают в изложницы, где происходит остывание и кристаллизация металла.



Рис. 4.6. Образец железа

В процессе кристаллизации выделяется большое количество газов и неметаллических включений. Сталь, полученную таким способом, по степени раскисления называют кипящей. Качество такой стали невысокое. В период остывания стали можно ввести специальные раскислители – кремний, марганец, алюминий и др., которые связывают газы и успокаивают процесс кристаллизации. Полученную сталь в этом случае называют спокойной. Качество спокойной стали выше, чем кипящей. В случае неполного раскисления получают промежуточную сталь – полуспокойную.

Стали, в которых кроме железа и углерода присутствуют только нормальные примеси, называют углеродистыми.

Нормальные примеси могут быть полезными – кремний, марганец и вредными – сера, фосфор, кислород. Содержание примесей ограничено.

По содержанию углерода стали классифицируют на малоуглеродистые – 0,09–0,22 % углерода, среднеуглеродистые – 0,25–0,5 % углерода и высокоуглеродистые – 0,6–1,2 % углерода. Строительные стали являются малоуглеродистыми. Среднеуглеродистые стали в основном применяют в машиностроении. Высокоуглеродистые используют для инструментов.

Строительные и машиностроительные стали относят к группе конструкционных сталей. По механическим характеристикам конструкционные стали делят на семь марок: Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6. Основными строительными сталями являются Ст3 и Ст5, из которых изготавливают несущие металлические конструкции (рис. 4.7) и арматуру для железобетона. Из сталей Ст4 и Ст5 изготавливают также болты, шурупы и т. д.

Углеродистые стали обыкновенного качества в зависимости от гарантируемых свойств объединяют в группы А, Б и В. В маркировке эту

букву добавляют спереди, а в конце маркировки – способ раскисления: спокойный – сп, полуспокойный – пс, кипящий – кп, например: АСт3пс, ВСт4пс. По группе А стали поставляют с гарантированными механическими свойствами, по группе Б – химическому составу, по группе В – по механическим свойствам и химическому составу.



Рис. 4.7. Стальной несущий каркас промышленного здания

По требованиям ударной вязкости в зависимости от температурных условий эксплуатации и назначения конструкций углеродистые стали разделяют на 6 категорий (номер категории указывают в конце маркировки после обозначения способа раскисления), например, ВСт3кп2.

Существенного улучшения физико-механических свойств сталей можно добиться введением в их состав специальных легирующих добавок.

Стали, в которых кроме нормальных примесей присутствуют легирующие добавки, называют легированными.

В зависимости от характера влияния легирующие добавки делят на добавки группы никеля и группы хрома. Входящие в эти группы химические элементы и их условные обозначения приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1  
Материалы, применяемые в качестве легирующих добавок

Группа никеля		Группа хрома	
Название материала	Условные обозначения	Название материала	Условные обозначения
Никель	Н	Хром	Х
Марганец	Г	Титан	Т
Медь	Д	Алюминий	Ю
Кобальт	К	Вольфрам	В
Азот и др.	А	Ванадий	Ф
		Кремний	С
		Цирконий	Ц
		Ниобий	Б
		Бор	Р
		Молибден и др.	М

По сравнению с углеродистыми, легированные стали имеют, как правило, более высокие показатели прочности, ударной вязкости, стойкости к коррозии, лучше свариваются. Недостатком легированных сталей является более высокая стоимость, чем углеродистых.

Легированные стали классифицируют в основном по следующим признакам:

- по количеству легирующих добавок: низколегированные – количество добавок до 2,5 %, среднелегированные – количество добавок от 2,5 до 10 % и высоколегированные – количество добавок свыше 10 %;
- по назначению: конструкционные – машиностроительные и строительные) стали; инструментальные; специальные – нержавеющие, кислотостойкие, жаростойкие.

По экономическим соображениям в строительстве применяют низколегированные стали.

Маркируют легированные конструкционные (в том числе и строительные) стали следующим образом. Первые две цифры показывают содержание углерода в сотых долях процента. Затем следуют условные обозначения легирующих элементов. Цифра, стоящая за условным обозначением, показывает приблизительное содержание элемента в процентах. Например, сталь 18Гсп в среднем содержит 0,18 % углерода и приблизительно 1 % марганца. Буквы сп обозначают, что сталь спокойная (по способу раскисления). Сталь 20ХГ2С в среднем содержит 0,2 % углерода, приблизительно 1 % хрома, около 2 % марганца и 1 % кремния. Если количество легирующих добавок менее 0,3 %, то обозначение легирующего элемента не проставляется. Буква А в конце марки означает, что сталь высококачественная. В строительстве применяют низколегированные стали: 18Г; 09Г2; 10Г2С1; 20ХГ2С и др.

Механические характеристики некоторых строительных сталей представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Механические характеристики некоторых строительных сталей

Марка стали	Содержание углерода, %	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_s(\sigma_{0.2})$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Твердость по Бринелю НВ, МПа
ВСт3кп	0,14–0,22	370–470	220–240	24–27	1200
ВСт3сп	–	380–490	230–250	23–26	–
ВСт5сп	0,28–0,37	500–640	270–290	17–20	1500
10Г2С1	0,12	480–520	340–380	21	1100
30ХГ2С	0,26–0,35	882	588	6	1500

Большое влияние на механические характеристики сталей оказывает содержание углерода. С повышением содержания углерода твердость

сталей увеличивается, а пластичность уменьшается. Упругость сталей изменяется мало. Модуль упругости изменяется в пределах  $2 \cdot 10^5$ – $2,06 \cdot 10^5$  МПа. Предел прочности увеличивается до содержания углерода 0,8–1,0 %, а затем снижается (рис. 4.8).

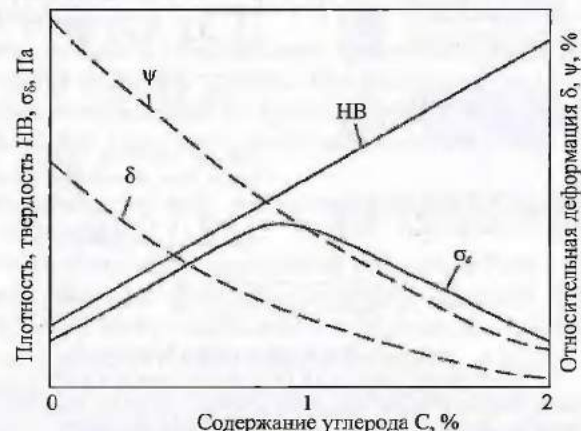


Рис. 4.8. Влияние содержания углерода на механические свойства стали

В строительстве сталь применяют в виде прокатных изделий, получаемых с металлургических заводов и имеющих различную форму поперечного сечения – профиль. Каталог прокатных профилей называют сортаментом (рис. 4.9).

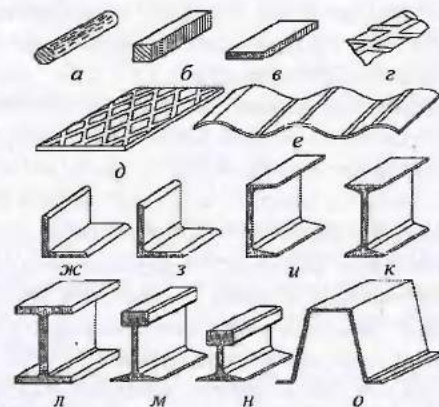


Рис. 4.9. Сортамент прокатных стальных профилей:

- а – круглый; б – квадратный; в – плоский; г – периодического профиля;
- д – ребристого профиля; е – волнистый; жс – уголок равнобокий;
- з – уголок неравнобокий; и – швеллер; к – двутавр; л – тавр сварной;
- м – подкрановая балка; н – рельсовая балка; о – балка для шахтного крепления



Используют сталь в строительстве для изготовления несущих конструкций: колонн, балок, ферм, для арматуры железобетонных конструкций (рис. 4.10), для изготовления оконных и дверных переплетов и др.

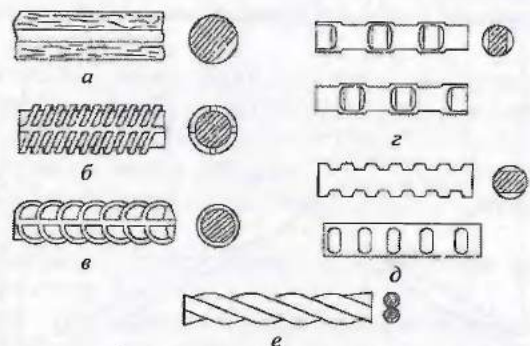


Рис. 4.10. Виды арматурных изделий:  
 а – горячекатаная стержневая арматура класса А-I;  
 б – горячекатаная стержневая периодического профиля класса А-II;  
 в – то же, класса А-III; з – холодносплюснутая с четырех сторон;  
 д – то же, с двух сторон; е – витая

Основным способом получения стальных изделий является горячая прокатка. Этим способом получают различные профили, листы, стержни, трубы. Изделия в этом случае называют горячекатаными.

Важной особенностью сталей является способность улучшать свои физико-механические свойства (в частности, прочность) в результате термической и механической обработки.

К термическим видам обработки, применяемым для строительной стали, относят закалку и отпуск. Закалка стали заключается в нагреве ее до высоких температур с последующим охлаждением в воде, масле, расплавленном свинце. Структура и свойства закаленных сталей зависят от скорости охлаждения. Стали, прошедшие закалку, имеют повышенную прочность и твердость, однако при этом имеют склонность к хрупкому разрушению.

Отпуск стали производят в целях уменьшения внутренних напряжений, возникающих при закалке, а также для снижения хрупкости и твердости закаленной стали. Стали при этом нагревают до температуры не выше 600 °С и после изотермической выдержки постепенно охлаждают.

Проволоку изготавливают путем вытяжки (волочения). Некоторые виды арматуры периодического профиля изготавливают путем холодного сплюсывания. И в том и в другом случае сталь упрочняется за счет наклепа. Арматуру при этом называют холоднотянутой.

#### 4.1.2. Алюминиевые сплавы

В чистом виде алюминий применяют редко из-за малой прочности. В строительстве все шире используют алюминиевые сплавы. Алюминиевые сплавы разделяют на две основные группы: литейные и обрабатываемые под давлением.

Литейные сплавы в строительстве применяют ограниченно – только для изготовления фасонных отливок. Представителем этих сплавов является силумин – сплав алюминия с кремнием. Обозначают литейные сплавы буквами АЛ. Цифра после букв обозначает условный номер сплава, например, АЛ2, АЛ3 и т. п.

Сплавы, обрабатываемые давлением (прокаткой, ковкой, штамповкой), делят на 2 группы:

1. Деформируемые без последующей термообработки:
  - сплавы алюминия с магнием, например, магналий. Обозначение – АМг3, АМг5, АМг6. Цифра показывает содержание магния в процентах (%);
  - сплавы алюминия с марганцем; обозначение – АМц.
2. Деформируемые с последующей термообработкой:
  - сплавы алюминия с медью, магнием, кремнием и марганцем: авиаль – АВ-Т, АВ-Т1; буква Т – обозначает термическое упрочнение; (цифра 1 обозначает искусственное старение); дюралюмины – Д1-Т, Д16-Т, цифра после буквы Д обозначает условный номер сплава;
  - высокопрочные сплавы алюминия с цинком, магнием, кремнием и марганцем – В92-Т, В92-П и т. п. Буква В обозначает, что сплав высокопрочный, цифры обозначают условный номер сплава.

Сравнительно давно введена новая маркировка алюминиевых сплавов – цифровая, например, 1915-Т (Т – термически упрочненный сплав). В маркировке первая цифра означает, что основа сплава – Аl; вторая – номер композиции компонентов: 0 – чистый Аl; 1 – Аl+Cu+Mg; 3 – Аl+Mg+Si; 4 – Аl+Mn; 5 – Аl+Mg; 9 – Аl+Zn. Две последние цифры обозначают порядковый номер сплава.

Достоинством алюминиевых сплавов является высокий предел прочности – до 500–700 МПа, при малой плотности – 2850 кг/м<sup>3</sup>. Большинство алюминиевых сплавов имеют высокую стойкость к коррозии, хорошую декоративность. Сохраняют высокую прочность при низких температурах, не образуют искр при ударе.

К недостаткам алюминиевых сплавов следует отнести: низкий модуль упругости – приблизительно в 3 раза меньше, чем у стали, и высокий коэффициент температурного расширения в 3 раза больше, чем у стали.

Увеличения прочностных свойств алюминиевых сплавов можно достигнуть либо холодной пластической деформацией, либо термической обработкой. В основе упрочнения при пластической деформации лежит

явление наклепа (для алюминиевых сплавов используют термин нагартовка). В зависимости от степени наклепа (нагартованности) к обозначению сплава добавляют буквы: П – полунагартованный сплав, Н – нагартованный сплав, Н1 – усиленно нагартованный сплав.

Термическая обработка алюминиевых сплавов состоит из двух операций: закалки и старения.

В строительстве применяют алюминиевые листы для покрытия кровли зданий. Из алюминиевого проката изготавливают оконные и дверные переплеты.

Алюминиевые сплавы в строительстве употребляют в виде разнообразных профилей и листа. Из профилей изготавливают фермы и арки. Листы широко используют для изготовления легких навесных панелей типа «сэндвич», для облицовки стен, устройства подвесных потолков.

#### 4.2. Поведение металлов и сплавов в условиях пожара

При нагреве металла подвижность атомов повышается, увеличиваются расстояния между атомами и связи между ними ослабевают. Термическое расширение нагреваемых тел – признак увеличения межатомных расстояний. Большое влияние на ухудшение механических свойств металла оказывают дефекты, число которых возрастает с увеличением температуры. При температуре плавления количество дефектов, увеличение межатомных расстояний и ослабление связей достигает такой степени, что первоначальная кристаллическая решетка разрушается. Металл переходит в жидкое состояние.

В интервале температур от абсолютного нуля до точки плавления изменение объема всех типичных металлов приблизительно одинаково – 6–7,5 %. Исходя из этого, можно считать, что увеличение подвижности атомов и расстояний между ними и соответственно ослабление межатомных связей свойственно всем металлам почти в одинаковой степени, если они нагреты до одной и той же гомологической температуры. Гомологическая температура – это относительная температура, выражается в долях температуры плавления  $T_{пл}$  по абсолютной шкале Кельвина. Так, железо и алюминий при  $0,3T_{пл}$  обладают одинаковой прочностью межатомных связей, а следовательно, и одинаковой механической прочностью. По степенной шкале это будет: для железа 331 °С, для алюминия 38 °С, т. е.  $\sigma_b$  железа при 331 °С равно  $\sigma_b$  алюминия при 38 °С.

Повышение температуры приводит к уменьшению прочности, упругости и увеличению пластичности металлов. Общий характер такой зависимости показан на рис. 4.11 для холоднотянутой арматурной проволоки из стали Ст3.

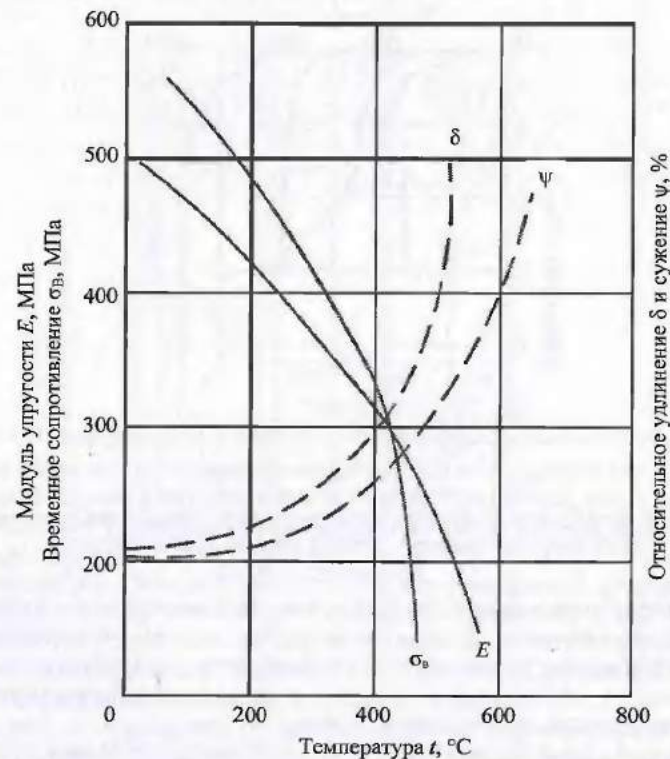


Рис. 4.11. Зависимость физико-механических свойств стали Ст3 от температуры

При высоких температурах также происходит увеличение деформаций ползучести, которые являются следствием увеличения пластичности металлов. Развитие деформаций ползучести высокопрочной арматурной стали при нагреве при различных величинах нагружения  $\gamma_s$  показаны на рис. 4.12, из которого видно, что чем выше величина нагружения образцов, тем при более низких температурах начинается развитие деформации ползучести и происходит разрыв образца, причем при меньших величинах относительной деформации.

Чем ниже температура плавления металла или сплава, тем при более низких температурах происходит снижение прочности, например, у алюминиевых сплавов – при более низких температурах, чем у сталей.

При повышении температуры изменяются и теплофизические свойства металлов и сплавов. Характер этих изменений сложный и трудно поддается объяснению.

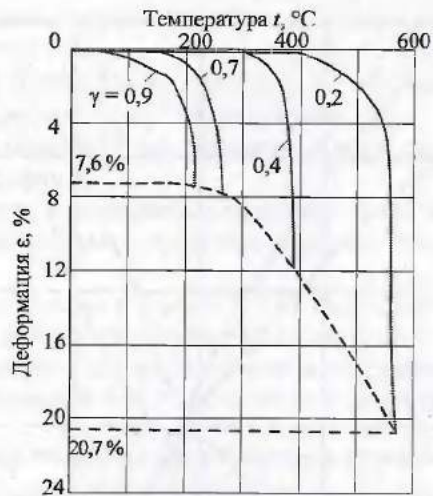


Рис. 4.12. Развитие деформаций ползучести арматуры класса В-II при температурном нагреве по стандартному режиму (при толщине защитного слоя 0,03 м) [7, 9, 10]

Примеры зависимости коэффициента теплопроводности и удельной объемной теплоемкости стали от температуры нагрева для некоторых видов сталей показаны на рис. 4.13, 4.14. Имеющиеся на графиках экстремумы связаны, по-видимому, с изменением кристаллической структуры стали за счет аллотропных превращений железа.

Несколько иной характер имеет при нагревании поведение низколегированных сталей. При нагревании до 300 °С происходит некоторое увеличение прочности ряда низколегированных сталей (25Г2С, 30ХГ2С и др.), которая сохраняется и после остывания. Поведение сталей в условиях пожара имеет особенности, которые зависят от ряда факторов (см. рис. 4.1).

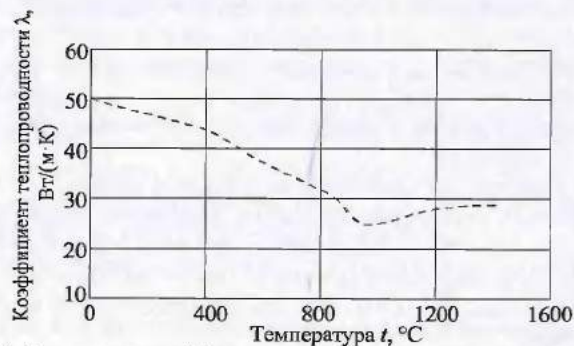


Рис. 4.13. Зависимость коэффициента теплопроводности стали от температуры

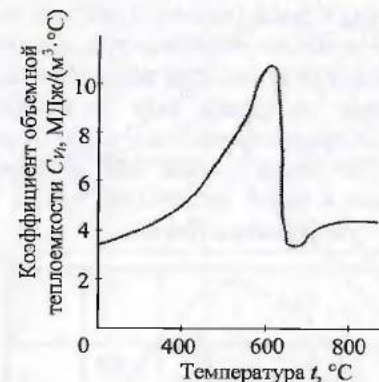


Рис. 4.14. Зависимость удельной объемной теплоемкости стали от температуры

Так, на характер поведения оказывает влияние, прежде всего, химический состав стали: углеродистая или низколегированная, затем способ изготовления или упрочнения арматурных профилей: горячая прокатка, термическое упрочнение, холодная протяжка и т. п. Рассмотрим эти особенности подробнее. При нагревании образцов горячекатаной арматуры из углеродистой стали происходит уменьшение ее прочности и увеличение пластичности, что приводит к снижению пределов прочности, текучести, возрастанию относительного удлинения δ и сужения ψ. При остывании такой стали ее первоначальные свойства восстанавливаются.

На рис. 4.15 показаны графики изменения прочности стали Ст3 при нагреве, полученные экспериментально в горячем состоянии и после остывания образцов.

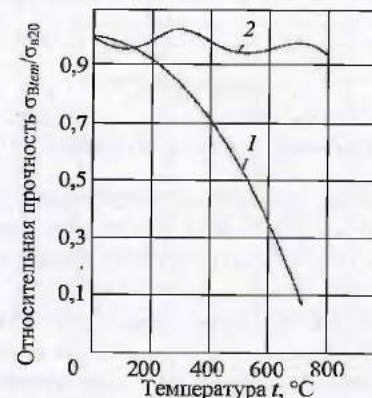


Рис. 4.15. Изменение прочности горячекатаной стержневой арматуры класса А-I из стали марки Ст3 при нагревании: 1 – в горячем состоянии; 2 – после остывания [7]

Из этих графиков видно, что после остывания величина относительной прочности углеродистой стали (арматура классов А-I, А-II) практически восстанавливается. Несколько иной характер поведения при нагревании имеют низколегированные стали. При нагревании до 300 °С происходит некоторое увеличение прочности ряда низколегированных сталей (25Г2С, 30ХГ2С и др.), которая сохраняется и после остывания (рис. 4.16). Следовательно, низколегированные стали при невысоких температурах даже повышают прочность и менее интенсивно теряют ее с увеличением температуры благодаря легирующим добавкам.

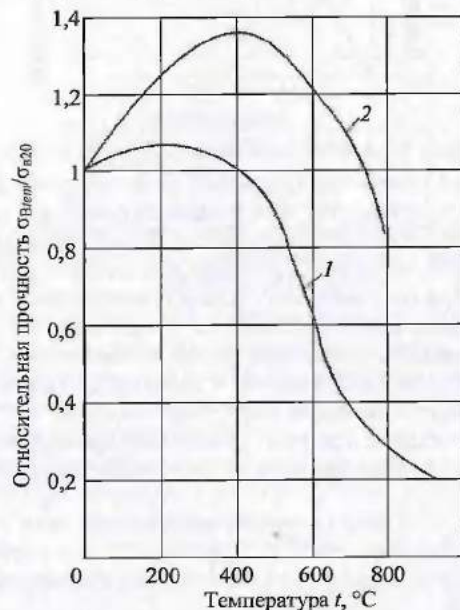


Рис. 4.16. Изменение прочности низколегированной стали 25Г2С при нагревании: 1 – в горячем состоянии; 2 – после остывания [7, 9, 10]

Особенностью поведения термически упрочненной арматуры в условиях пожара является необратимая потеря упрочнения, которая вызывается отпуском стали. На рис. 4.17 показано изменение механических характеристик свойств термически упрочненной стали марки 20ГС. На рисунке видно, что при нагревании до 400 °С может происходить некоторое улучшение механических свойств термически упрочненной стали, выражаемое в повышении условного предела текучести при сохранении предела прочности. При температуре выше 400 °С происходит необратимое снижение как предела текучести, так и предела прочности (временного сопротивления).

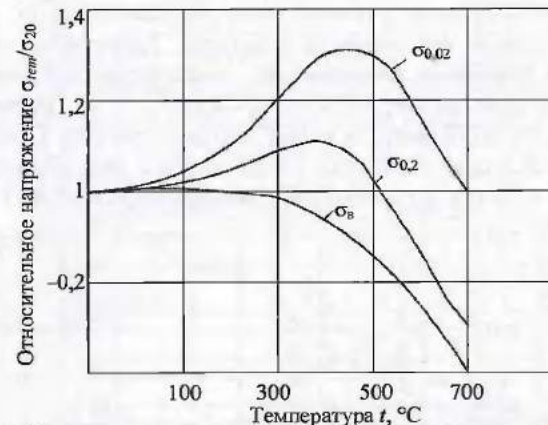


Рис. 4.17. Изменение механических характеристик термически упрочненной стали марки 20ГС при нагревании:  $\sigma_{0,02}$  – условный предел упругости;  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести;  $\sigma_B$  – временное сопротивление разрыву (предел прочности) [7]

Арматурная проволока, упрочненная наклепом, при нагреве также необратимо теряет упрочнение. Чем выше степень упрочнения (наклепа), тем при более низкой температуре начинается ее потеря. Причиной этого является термодинамически неустойчивое состояние кристаллической решетки упрочненной наклепом стали. При повышении температуры до 300–350 °С начинается процесс рекристаллизации, в ходе которого деформированная в результате наклепа кристаллическая решетка перестраивается в сторону нормализации [7]. На рис. 4.18 показано изменение прочности при нагревании холоднотянутой проволоки с различной степенью упрочнения.

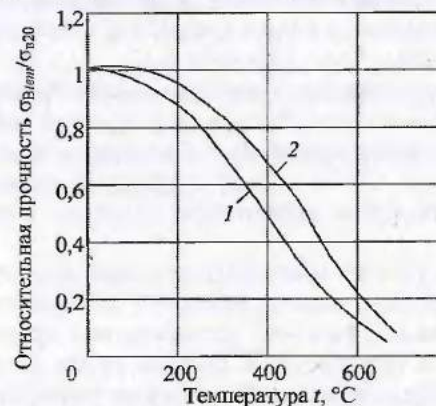


Рис. 4.18. Изменение относительной прочности холоднотянутой проволоки при нагревании: 1 – обыкновенной В-I; 2 – высокопрочной ВП [7]

Главной особенностью алюминиевых сплавов является низкая, по сравнению со сталями, устойчивость к нагреву. Характерное для алюминиевых сплавов изменение механических свойств при действии высокой температуры показано на рис. 4.19 для сплава АД31-Т1, относящегося к группе авиалей. Из этого рисунка видно, что уже при 240 °С предел прочности и условный предел текучести снижаются в 2 раза. При этом происходит снижение модуля упругости и увеличение относительного удлинения.

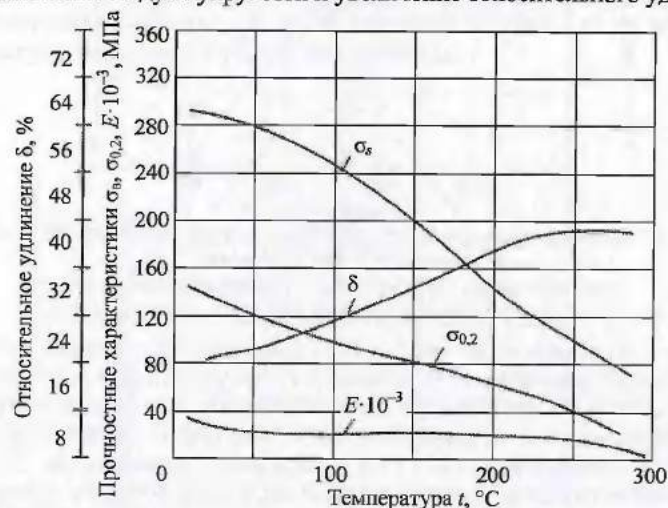


Рис. 4.19. Изменение механических свойств сплава АД31-Т1 при нагревании [7]

Важной особенностью некоторых алюминиевых сплавов является способность восстанавливать прочность после нагревания и охлаждения, если температура нагревания не превысила 400 °С. Этой особенностью обладают, например, сплавы АМц, АМг (рис. 4.20).

Наибольшей устойчивостью к действию высокой температуры обладают низколегированные стали. Несколько хуже ведут себя углеродистые стали без дополнительного упрочнения. Еще хуже — стали, упрочненные термическим способом. Самой низкой стойкостью к действию высокой температуры обладают стали, упрочненные наклепом, а еще ниже — алюминиевые сплавы.

На рис. 4.11, 4.14–4.19 проиллюстрированы результаты испытаний образцов при нагреве (либо после остывания) в ненагруженном состоянии. Наличие нагрузки интенсифицирует деструктивные процессы в металлических сплавах в виде температурной ползучести (см. рис. 4.12), ускоряет время разрушения образцов (изделий) и снижает температуру достижения их предельных (критических) состояний.

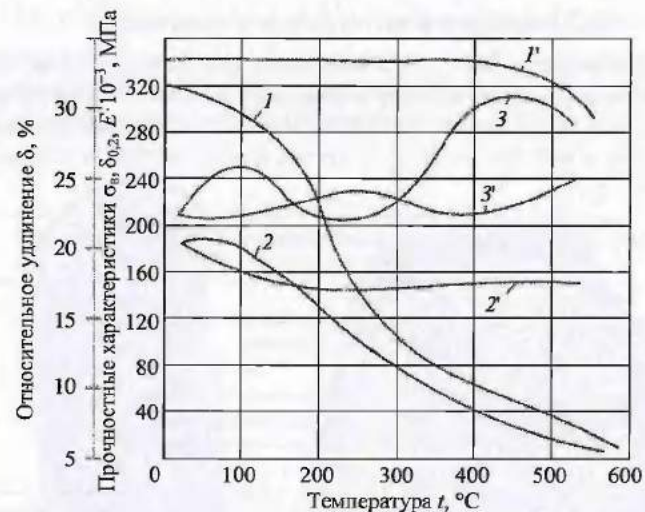


Рис. 4.20. Изменение механических свойств сплава АМг-б при нагревании (1, 2, 3) и после остывания (1', 2', 3') [7]

#### 4.3. Способы повышения стойкости металлов к воздействию пожара

Обеспечить некоторое продление времени сохранения свойств металлов в условиях пожара (в случаях, где это необходимо и экономически оправдано) можно следующими способами:

- 1) выбором изделий из металлов, более стойких к воздействию пожара. В этом плане предпочтение отдается сталям вместо алюминиевых сплавов, причем низколегированным сталям вместо углеродистых. При выборе арматурных изделий следует предпочесть арматуру, не упрочненную наклепом и термообработкой;
- 2) специальным изготовлением металлических изделий, более стойких к нагреву (с учетом информации по п. 1);
- 3) огнезащитой металлоизделий (конструкций) посредством нанесения внешних теплоизоляционных слоев.

## 5. Древесина и ее пожарная опасность

Для квалифицированного прогнозирования и регулирования поведения древесины в условиях пожара целесообразно изучить определяющие факторы, влияющие на ее поведение в условиях пожара, негативные процессы, которые в ней при этом происходят, и последствия, к которым они приводят (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Структурная схема-ключ к изучению, оценке, прогнозированию, регулированию поведения древесины в условиях пожара и определению области ее безопасного применения в строительстве

## 5.1. Строение, химический состав и свойства древесины

Макростроение древесины рассматривают на срезе ствола дерева по трем направлениям: тангенциальному, торцевому и радиальному (рис. 5.2), а также на поперечном (торцевом) разрезе (рис. 5.3, 5.4).

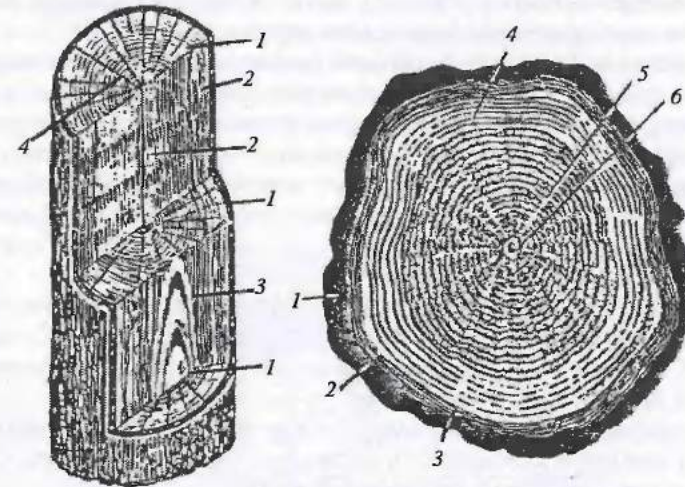


Рис. 5.2. Строение древесины по основным разрезам древесного ствола:

- 1 – торцевой разрез;
- 2 – радиальный разрез;
- 3 – тангенциальный разрез;
- 4 – сердцевинные лучи

Рис. 5.3. Строение ствола дерева на поперечном разрезе:

- 1 – кора;
- 2 – луб;
- 3 – камбий;
- 4 – заболонь;
- 5 – ядро;
- 6 – сердцевина



Рис. 5.4. Поперечный разрез ствола древесины

Кора, защищающая дерево от механических повреждений, состоит из двух слоев – наружного (корки) и внутреннего (луба). Находящийся под лубом тонкий слой камбия состоит из живых клеток. Толстый слой

древесины, находящийся за камбием, состоит из ряда тонких концентрических слоев; наружная часть их называется заболонью, внутренняя часть – ядром. Ядро состоит из отмерших клеток, заболонь – из молодых растущих клеток. Существуют породы дерева, например, береза, клен, ольха, не имеющие ядра. В центре ствола расположена сердцевина – самая слабая, легко крошится и загнивает. Для получения строительных изделий используют заболонную и ядровую части ствола дерева.

Древесина имеет различные пороки (дефекты) строения, понижающие ее качество. Пороки подразделяют на первичные – на растущих деревьях и вторичные, возникающие при хранении или эксплуатации древесины.

К первичным порокам относят: сучковатость – наличие сучков; косо-слой – винтообразное, косое расположение волокон в стволе; свилеватость – волнистое и путаное расположение древесных волокон; сбежистость – уменьшение диаметра ствола от комля (основания) к вершине; завиток – местное искривление годовых слоев.

Вторичные пороки древесины – это плесень и гниль, появляющиеся на древесине в результате деятельности микроорганизмов и грибов; червоточины и трещины, появляющиеся в результате усушки древесины в процессе хранения или эксплуатации.

При рассмотрении тангенциального и радиального срезов видна волокнистая структура древесины. Под микроскопом можно увидеть, что волокна древесины состоят из органических клеток.

Оболочку клеток образует в основном природное высокомолекулярное вещество – целлюлоза или клетчатка  $(C_5H_8O_4)_n$ . Кроме целлюлозы в химический состав древесины входят лигнин и гемицеллюлозы  $(C_5H_8O_4)_n$ ; пентозаны и гексозаны.

Элементный состав абсолютно сухой древесины: 49–52 % углерода, 43–45 % кислорода, 6–6,3 % водорода, 0,1–0,6 % азота, 0,3–1,6 % минеральных веществ. Свежесрубленная древесина содержит, кроме того, 60–100 % воды (по отношению к сухой массе).

Влажность древесины  $W_d$  – способность древесины поглощать влагу оказывает очень большое влияние на ее качество, а также на другие свойства; определяют по формуле

$$W_d = \frac{m_b - m_c}{m_c} \cdot 100 \%, \quad (5.1)$$

где  $m_b$  – масса образца до высушивания;

$m_c$  – масса образца после высушивания до постоянного значения.

Для древесины нормальной (стандартной) считают влажность 12 %, и при определении механических характеристик древесины результаты приводят для сравнения к этой величине влажности. Свободная влага состоит из той, что заполняет полости клеток, сосудов и межклеточное

пространство (механическая влага), и влаги гигроскопической, находящейся в микропорах стенок клеток и сосудов. При сушке и при пожаре древесина сначала теряет механическую влагу и только после полного ее удаления начинает выделять гигроскопическую влагу. По степени влажности различают древесину свежесрубленную, имеющую влажность 35 % и выше; воздушно-сухую с влажностью 15–20 %; комнатно-сухую с влажностью 8–13 %, а также мокрую, влажность которой больше, чем у свежесрубленной древесины и может быть больше 100 % (масс.). Для определения влажности древесины, находящейся в помещении с различной температурой и влажностью окружающего воздуха, служит диаграмма, составленная Н. Н. Чухлицким. На этой диаграмме (рис. 5.5) по оси ординат отложена влажность, по оси абсцисс – температура воздуха; наклонные линии характеризуют соответствующую влажность древесины.

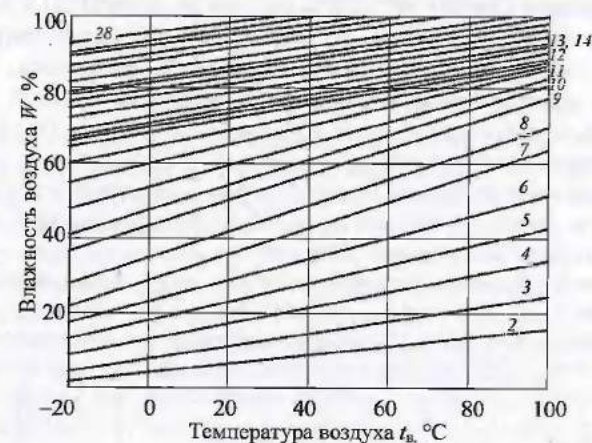


Рис. 5.5. Диаграмма зависимости влажности древесины (цифры над прямыми) от температуры и относительной влажности воздуха

При удалении из древесины механической влаги масса древесины меняется, но объем и линейные размеры не изменяются. При удалении гигроскопической влаги происходит уменьшение размеров и объема изделия из древесины, называемое усушкой. Процесс, обратный усушке, называют разбуханием древесины. Этот процесс происходит при увеличении содержания в древесине гигроскопической влаги. Вследствие неоднородности строения древесина усыхает или разбухает в различных направлениях неодинаково: вдоль волокон полная линейная усушка не превышает 0,1–0,3 %, в радиальном направлении она составляет от 3 до 6 %, а в тангенциальном – от 7 до 12 %. Усушка древесины приводит к ее короблению и появлению трещин.

Объемная масса древесины зависит от породы древесины и составляет 375–700 кг/м<sup>3</sup>. Обычно объемную массу приводят к нормальной 12%-й влажности древесины. Плотность древесины  $\rho$  составляет в среднем 1500 кг/м<sup>3</sup> [11].

Теплофизические свойства древесины зависят от породы дерева, объемной массы, влажности и температуры. Теплопроводность, кроме того, зависит от направления, в котором передается тепло через древесину, а коэффициент линейного теплового расширения различен для древесины вдоль и поперек волокон. Значения коэффициента теплопроводности составляют в среднем для различных пород  $\lambda = 0,17$  Вт/(м·К) – поперек волокон и  $\lambda = 0,31$  Вт/(м·К) – вдоль волокон. Удельная теплоемкость примерно одинакова для древесины всех пород и составляет для сухой древесины  $c = 1,7–1,9$  кДж/(кг·К). Числовые значения коэффициента линейного теплового расширения древесины составляют  $\alpha = (2,4–5,6) \cdot 10^{-6}$  1/°C – вдоль волокон,  $\alpha = (31–58) \cdot 10^{-6}$  1/°C – поперек волокон [11].

Механические свойства древесины в значительной мере зависят от породы, объемной массы, влажности, возраста древесины, а также от направления действия нагрузки – вдоль или поперек волокон. Древесина вследствие волокнистого строения обладает анизотропностью и имеет довольно высокую прочность при растяжении и сжатии вдоль волокон и относительно низкую прочность поперек волокон. Временное сопротивление сжатию вдоль волокон изменяется от 34 МПа при объемной массе  $\rho_0 = 430$  кг/м<sup>3</sup> до 51 МПа – при  $\rho_0 = 700$  кг/м<sup>3</sup>.

Прочность древесины при сжатии вдоль волокон снижается с увеличением влажности. При этом оказывает влияние только гигроскопическая влага, механическая влага практического влияния не оказывает (рис. 5.6).

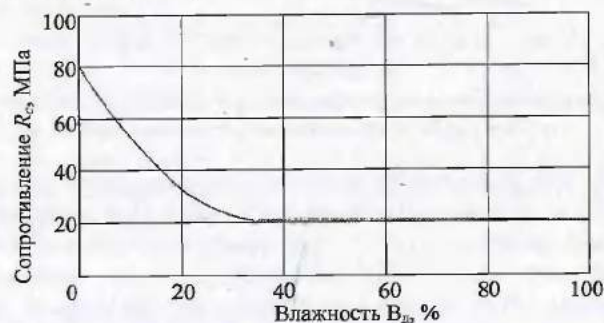


Рис. 5.6. Зависимость прочности древесины от влажности

Временное сопротивление древесины сжатию поперек волокон составляет примерно от 0,1 до 0,3 этой величины вдоль волокон. Временное сопротивление растяжению вдоль волокон в 2–3 раза превышает аналогичный показатель сжатия. У древесины низкая прочность на растяжение

поперек волокон: для хвойных пород она равна всего 2–5 % прочности на растяжение вдоль волокон. Прочность на растяжение мало зависит от влажности, но существенно зависит от наличия пороков. Прочность при изгибе определяется теми же факторами, что при сжатии и растяжении вдоль волокон: она больше прочности при сжатии вдоль волокон в 1,5–2 раза.

К числу достоинств древесины следует отнести: богатую сырьевую базу и сравнительную легкость добычи, невысокую стоимостью, высокую относительную прочность, малую теплопроводность при сравнительно высокой удельной теплоемкости, малую температурную деформативность, высокую коррозионную стойкость при эксплуатации в агрессивных средах. Недостатками древесины являются: анизотропность, наличие пороков, гигроскопичность, высокая пожарная опасность. Перечисленные достоинства и недостатки во многом определяют область применения древесины в строительстве.

## 5.2. Применение древесины в строительстве

Древесными называют материалы, состоящие полностью или преимущественно из древесины. Получают древесину путем обработки деревьев лиственных (береза, дуб, бук, ясень, осина и др.) и хвойных пород (сосна, ель, кедр, лиственница, пихта и др.).

Наряду с использованием в качестве декоративно-отделочного материала древесина используется для несущих конструкций. Опыт и расчеты доказали экономическую выгоду замены в некоторых случаях железобетонных и металлических конструкций деревянными. Для изготовления несущих деревянных конструкций применяются преимущественно хвойные породы. Наиболее прогрессивными являются клеёные деревянные конструкции (рис. 5.7).



Рис. 5.7. Несущие деревянные клеёные конструкции при строительстве аквапарка в парке 300-летия Санкт-Петербурга



В строительстве зданий древесину применяют в виде изделий: круглых, пиломатериалов, полуфабрикатов и строительных деталей.

Круглые изделия – бревна (отрезки стволов) различают строительные и пиловочные. Строительные используют для несущих конструкций. Пиловочные предназначаются для получения пиломатериалов в виде брусьев, досок, брусков. Брусья – пиломатериалы, ширина и толщина которых превышает 110 мм. Брусья применяют для несущих конструкций зданий: балок междуэтажных перекрытий, стропил и т. п. Досками называют пиломатериалы толщиной до 100 мм при отношении ширины к толщине более 2. Пиломатериалы толщиной не более 100 мм и при отношении ширины к толщине менее 2 называют брусками. Доски применяют для устройства полов, перегородок, а также для обшивки стен и потолков. Из древесины изготавливают плинтусы, поручни, наличники для обшивки оконных и дверных коробок, паркет, фанеру.

Фанерой называют листы древесины, получаемые склеиванием по толщине шпона (тонкие слои древесины) (рис. 5.8).



Рис. 5.8. Образцы фанеры

Фанеру применяют при изготовлении несущих и ограждающих конструкций, для обшивки стен внутри помещений и для устройства перегородок.

Строительные детали и элементы сборных конструкций из древесины изготавливают на заводах. К ним относятся балки для междуэтажных и чердачных перекрытий, дощатые щиты для перегородок, элементы щитовых и каркасных сборных домов, щитовой паркет, различные столярные изделия.

Древесноволокнистые (ДВП) и древесностружечные (ДСтП) плиты (рис. 5.9) в настоящее время широко используют вместо фанеры при устройстве потолков, полов, стен и перегородок.



Рис. 5.9. Образец древесностружечной твердой плиты (ДСтП)

### 5.3. Физико-химические процессы, определяющие поведение древесины и материалов на ее основе при нагревании и в условиях пожара

Древесина чувствительна к нагреву. Уже при температуре материала порядка 110 °С начинается терморазложение древесины, которое можно разделить на несколько характерных стадий. При нагревании до 120–180 °С происходит удаление свободной и затем начинается выделение химически связанной влаги, разложение наименее термически стойких компонентов древесины в основном с выделением  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . При температуре 250 °С начинается пиролиз древесины (в основном гемицеллюлоз) с выделением  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и т. п. Образующаяся газовая смесь уже способна к воспламенению от источника зажигания. При температуре 280–300 °С процесс терморазложения древесины интенсифицируется. Лигнин разлагается лишь при достижении 350–450 °С. При 350–450 °С продолжается пиролиз древесины и выделяется основная масса горючих газов – 40 % от возможного количества. Выделяющаяся газообразная смесь состоит из 25 %  $\text{H}_2$  и 40 % предельных и непредельных углеводородов. При достижении достаточной концентрации газообразных горючих продуктов терморазложения возможно их самовоспламенение [11].

Процесс горения древесины протекает в две стадии: пламенное горение продуктов терморазложения древесины и тление образовавшегося угольного остатка. Тление происходит в результате гетерогенной реакции угольного остатка с газообразным кислородом воздуха. В условиях пожара до 60 % тепла выделяется в период пламенного горения древесины и около 40 % – в период горения угля. В связи с этим период пламенного горения является определяющим, хотя занимает более короткий промежуток времени, чем фаза тления.

Термическое разложение и горение древесины на пожаре сопровождается выделением газообразных продуктов  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и др., которые могут оказывать токсическое (отравляющее) действие на организм человека.

Кроме того, при тлении и горении выделяется значительное количество дыма, который представляет собой дисперсную среду, образованную твердыми и жидкими частицами продуктов неполного сгорания древесины. Он снижает видимость и препятствует дыханию человека.

Способность поддерживать процесс горения за счет потока тепла от собственного пламени  $q_{fl}$  к близлежащему слою исходной древесины даже при отсутствии первоначального внешнего нагрева  $q_e$  служит основой развития горения и распространения пламени по поверхности древесины.

Распространение пламени по поверхности материала рассматривается как непрерывно повторяющийся процесс воспламенения образовавшихся горючих летучих продуктов разложения древесины. Собственное пламя в этом случае служит не только источником нагрева примыкающих слоев древесины, но и локальным источником воспламенения летучих горючих газов и паров.

В целом процесс горения древесины можно представить следующей схемой (рис. 5.10):

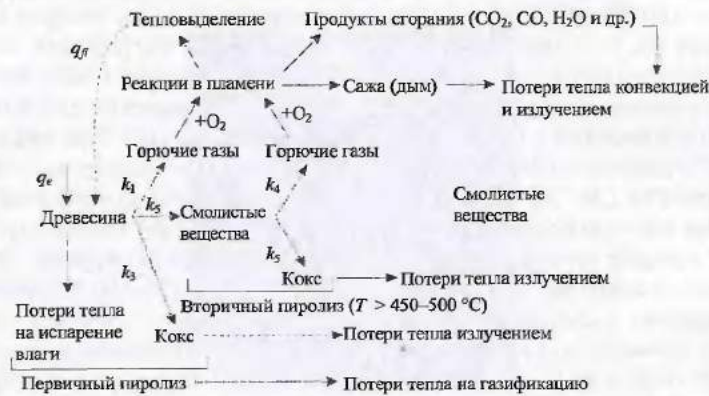


Рис. 5.10. Схема химических и физических процессов при пламенном горении древесины

В многостадийном процессе пламенного горения важными стадиями являются нагрев и разложение органического материала. Скорость его нагрева до температуры разложения зависит от теплофизических свойств, тесно взаимосвязанных со структурой древесины, а также от интенсивности внешнего теплового потока. Скорость разложения древесины при заданных условиях нагрева в значительной степени определяется химическим составом этого природного композита.

Пожарную опасность древесины можно охарактеризовать следующими параметрами. Температура воспламенения и самовоспламенения древесины составляют 250 и 450 °C соответственно. Линейная скорость распространения пламени по поверхности составляет 1–10 мм/с. Эта величина

существенно зависит от плотности внешнего теплового потока, падающего на древесину, от породы древесины и от ориентации образца материала в пространстве.

На рис. 5.11 показана зависимость линейной скорости распространения пламени по поверхности древесины сосны от плотности внешнего теплового потока при ориентации образца материала в вертикальной и горизонтальной плоскостях, соответствующих расположению облицовки стен и потолка. Скорость тления древесины существенно ниже скорости распространения пламени и составляет в среднем для различных пород древесины 0,6–1,0 мм/мин (0,01 мм/с).

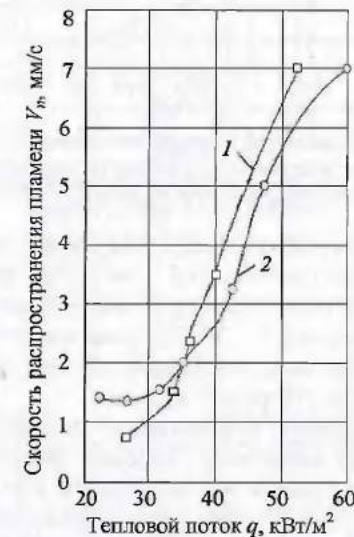


Рис. 5.11. Зависимость линейной скорости распространения пламени по древесине сосны от плотности внешнего теплового потока:  
1 – образец ориентирован в вертикальной плоскости;  
2 – образец ориентирован в горизонтальной плоскости

Массовая скорость выгорания древесины (потеря массы в единицу времени с единицы площади) в условиях пожара зависит от многих факторов: породы древесины, объемной массы, влажности, площади поверхности, интенсивности облучения и др.

На рис. 5.12 показано изменение массовой скорости выгорания древесины во времени в зависимости от величины внешнего теплового потока. При увеличении плотности теплового потока, подводимого к поверхности древесины, значения массовой скорости выгорания материала значительно возрастают.

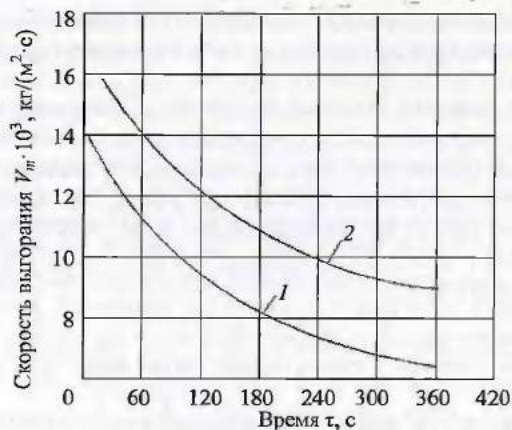


Рис. 5.12. Изменение массовой скорости выгорания древесины во времени в зависимости от плотности внешнего теплового потока:  
1 – интенсивность потока 30 кВт/м<sup>2</sup>; 2 – 20 кВт/м<sup>2</sup>

Для древесины хвойной разновидности сосны показатель токсичности продуктов горения составляет 21,5 г/м<sup>3</sup>. По классификации ГОСТ 12.1.044–89\* древесину различных пород и видов следует относить к группе высокоопасных материалов – Т3. Токсическое действие продуктов разложения и горения древесины в основном обусловлено высоким содержанием в их составе оксида углерода (СО).

Для древесины сосны коэффициент дымообразования по ГОСТ 12.1.044–89\* в режиме пламенного горения составляет приблизительно 50 м<sup>2</sup>/кг, что позволяет отнести ее к материалам с малой – Д1 или умеренной – Д2 дымообразующей способностью. Однако при тлении этот показатель может достигать  $D_m = 900$  м<sup>2</sup>/кг и более, т. е. тлеющая древесина может относиться к материалам с высокой дымообразующей способностью – Д3.

В условиях пожара снижается прочность древесины в результате ее терморазложения, т. е. разрушения структуры, во-вторых, при горении древесина обугливается. Изменение прочности древесины существенно зависит от потери массы материала в процессе нагрева. При этом происходит уменьшение и объемной массы.

На рис. 5.13, 5.14 и 5.15 показано изменение массы древесины сосны при нагревании и соответственно уменьшение объемной массы и прочности на растяжение. Следует обратить внимание на то, что разложение и обугливание древесины при нагревании является главной причиной снижения прочности. В то же время уменьшение объемной массы материала за счет обугливания приводит к уменьшению теплопроводности и, следовательно, тормозит прогрев древесины.

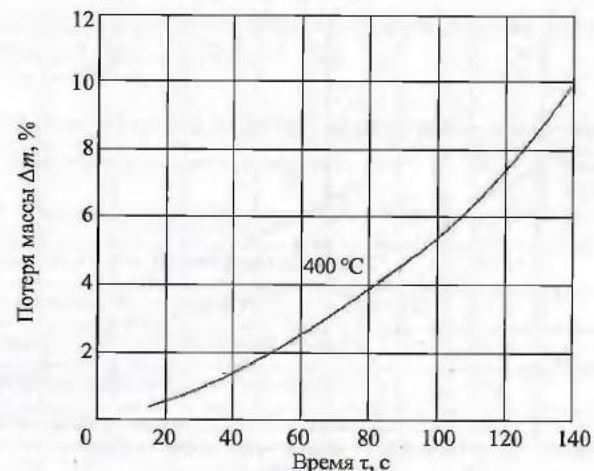


Рис. 5.13. Потеря массы древесины сосны во время нагревания при постоянной температуре

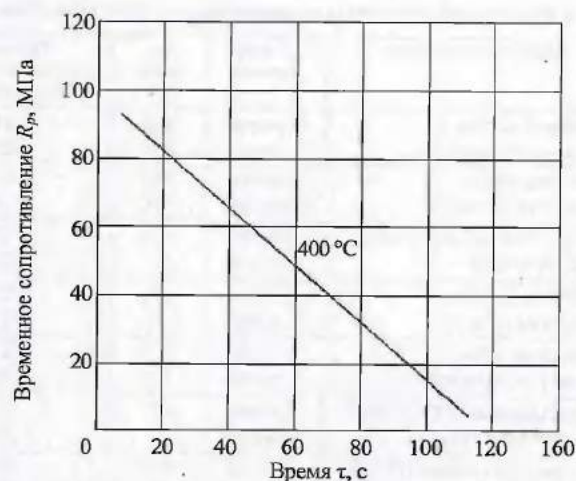


Рис. 5.14. Изменение временного сопротивления древесины сосны во времени при постоянной температуре

По классификации, приведенной в Ф3-123 [2], древесина всех пород относится к горючим материалам. В табл. 5.1 представлены данные по дымообразующей способности различных древесных материалов [12].

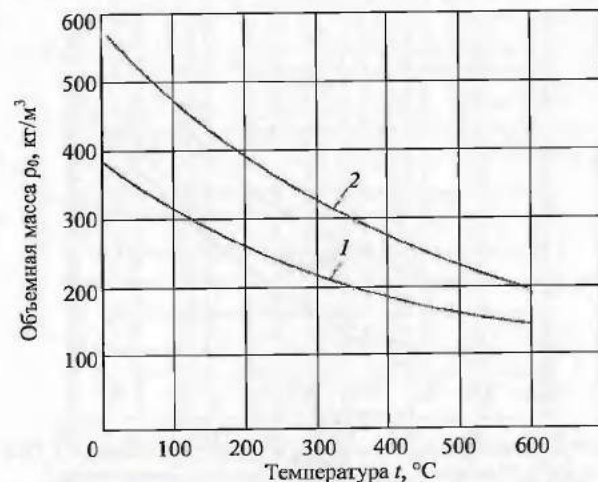


Рис. 5.15. Изменение объемной массы древесины при нагревании:  
1 — сосна; 2 — ель

Таблица 5.1

Результаты испытаний древесины на дымообразующую способность

Наименование древесного материала	Режим горения	$D_m$ м <sup>2</sup> /кг	Группа по дымообразующей способности
Древесина сосны (Московская область)	Тление	900	Д3
	Горение	180	Д2
Древесина сосны (Вологодская область)	Тление	980	Д3
	Горение	390	Д2
Древесина сосны (1830 год постройки, Дом Толстых)	Тление	670	Д3
	Горение	80	Д2
Древесина березы (Вологодская область)	Тление	650	Д3
	Горение	250	Д2
Древесина дуба (Вологодская область)	Тление	530	Д3
	Горение	110	Д2
Пиломатериалы лиственные (ГОСТ 2695-83) + три слоя лака ПФ-283	Тление	436	Д3
	Горение	53	Д2
Пиломатериалы хвойных пород (ГОСТ 8486-86) + два слоя олифы глифталевой	Тление	656	Д3
	Горение	61	Д2
Фанера березовая (ГОСТ 3916-69) шпон буквый (ГОСТ 2977-82)	Тление	474	Д3
	Горение	69	Д2
Древесноволокнистая плита	Тление	253	Д2
	Горение	13	Д1
Древесностружечная плита	Тление	50	Д1
	Горение	12-15	Д1

Классификация по токсичности продуктов горения древесных материалов приведена в табл. 5.2 [2, 3, 11, 12].

Таблица 5.2

Результаты испытаний древесины на токсичность продуктов горения

Наименование древесного материала	$H_{Cl,SO_2}$ г/м <sup>3</sup>	Группа по токсичности продуктов горения
Фанера ФСФ	25,3	Т3
Древесина сосны (Вологодская область)	21,2	Т3
Древесина сосны (1830 год постройки, Дом Толстых)	31,0	Т3
Древесина березы (Вологодская область)	25,8	Т3
Древесина дуба (Вологодская область)	26,3	Т3
Древесностружечная плита (ГОСТ 10632-77)	49,0	Т2

Таким образом, рассмотрение процессов разложения, воспламенения и горения древесины, а также количественных показателей пожарной опасности некоторых видов древесных материалов позволяют сделать вывод об их высокой пожароопасности.

## 6. Пластмассы и их пожарная опасность

Для квалифицированного прогнозирования и регулирования поведения полимерных строительных материалов (ПСМ) в условиях пожара целесообразно вначале изучить определяющие факторы (рис. 6.1).

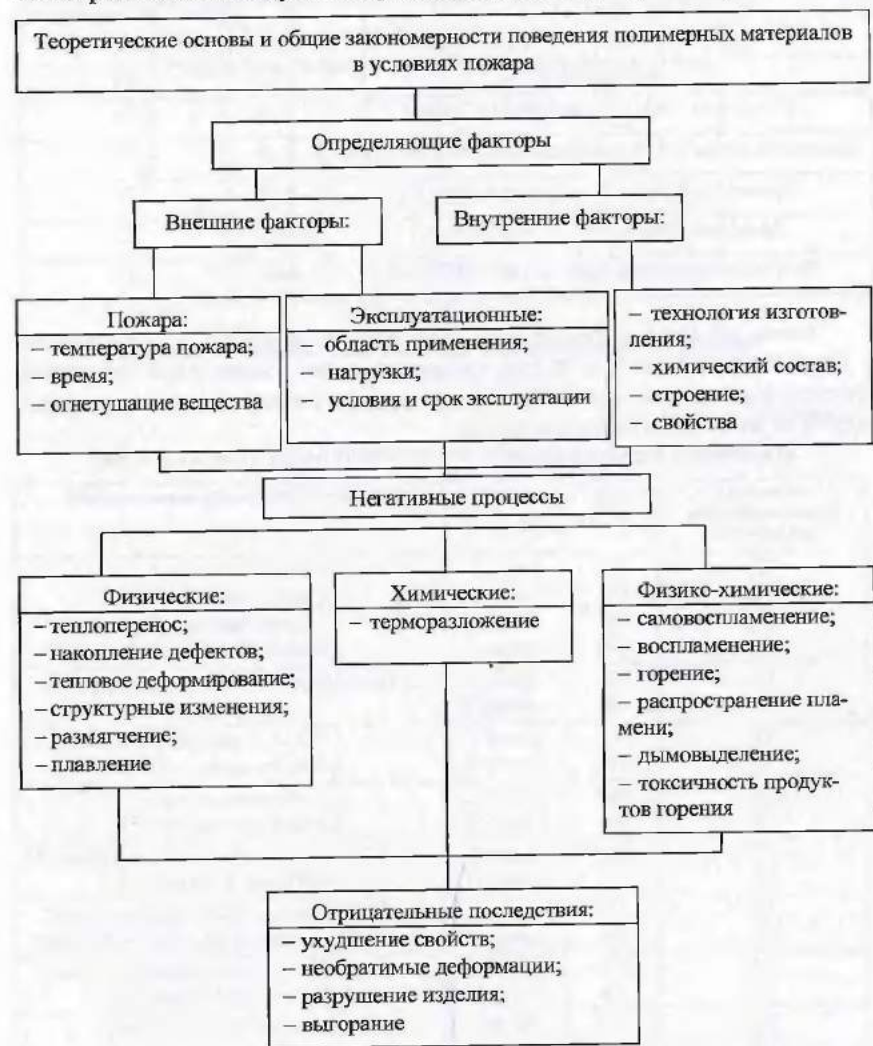


Рис. 6.1. Структурная схема-ключ к изучению, оценке, прогнозированию и регулированию поведения полимерных материалов в условиях пожара и области их безопасного применения в строительстве

### 6.1. Основные виды пластмасс, применяемых в строительстве, особенности их строения и свойств

*Пластмассы* – это композиционные материалы, в которых в качестве вяжущего вещества используют полимерные смолы.

Полимеры – высокомолекулярные химические соединения.

Достоинства пластмасс: неограниченность сырьевых ресурсов, возможность получения материала с заданными свойствами, высокая удельная прочность, хорошая технологичность при производстве изделий (штамповка, литье, экструзия, каландрирование), высокая химическая стойкость, хорошие электроизоляционные, гидро-, звуко- и теплоизоляционные свойства, легкость обработки и соединения, хорошие декоративные качества, стойкость к низким температурам.

Недостатки пластмасс: малый модуль упругости (0,1 МПа), большой коэффициент температурного расширения, повышенная ползучесть, способность к старению, малая теплостойкость и повышенная пожарная опасность.

Полимерные строительные материалы (строительные пластмассы) представляют сложную систему из связующего, наполнителей, красителей и технологических добавок. Связующим служат полимеры – полимеризационные и поликонденсационные. Их производство базируется на использовании каменного угля, нефти, природного газа, извести.

По происхождению сырья полимеры подразделяют на природные, искусственные (модифицированные) и синтетические. К природным полимерам относят битумы и пеки, натуральный каучук; к искусственным – продукты модификации целлюлозы, растительных масел, казеина; к синтетическим – получаемые (синтезируемые) искусственным путем (в природе эти вещества не встречаются).

По отношению к нагреванию полимеры подразделяют на термопластичные и термореактивные. Термореактивные полимеры образуются при повышенной температуре и сохраняют свою структуру и твердое состояние при последующем повторном нагревании вплоть до температуры разложения. Как правило, термореактивные полимеры имеют пространственную сетчатую структуру, обеспечивающую им необратимую термостойкость. Термопластичные полимеры способны обратимо размягчаться, плавиться и затвердевать при соответствующем изменении температуры.

По составу основной цепи макромолекул полимеры делят на углеводородные, основные цепи которых построены только из углеродных атомов; гетероцепные, в основных цепях которых кроме атомов углерода содержатся атомы кислорода, азота, серы, фосфора; элементоорганические, содержащие в основных цепях атомы кремния, бора, алюминия, титана, никеля – элементов, не входящих в состав природных органических соединений.

Наполнитель служит для удешевления пластмасс, улучшения их физико-механических свойств. Например, стекловолокно увеличивает прочность. По виду наполнителя различают пластмассы без наполнителя (оргстекло), газонаполненные (пенопласты и поропласты), порошковые, волокнистые (стекловолокнистый пластик, асбоволокнит, древесноволокнистые пластики (рис. 6.2)), слоистые (текстолит, асботекстолит, стеклотекстолит, древесно-слоистый пластик), крошкообразные (древесно-стружечные пластики, лоскутный асботекстолит).



Рис. 6.2. Образцы древесноволокнистого пластика

Красители (пигменты) вводят в пластмассы для придания декоративных качеств.

В целях снижения пожарной опасности пластмасс в их состав вводят антипирены – добавки, снижающие горючесть пластмасс, а также добавки, уменьшающие дымовыделение и образование токсичных продуктов при горении.

По применению в строительстве различают: материалы для полов, стеновые материалы, кровельные и гидроизоляционные для сантехнических и погонажных изделий, для несущих конструкций.

Полимеры обладают малой плотностью. Как правило, полимеризационные полимеры обладают меньшей плотностью и прочностью, чем поликонденсационные, однако они более пластичны.

Полимеры обладают высокой механической прочностью; временное сопротивление растяжению – до 100 МПа, сжатию – до 600 МПа, изгибу – до 140 МПа.

Теплостойкость полимеров, определяемая их составом и структурой, невысокая и составляет 40–140 °С. Исключение составляют политетрафторэтилен и кремнийорганические полимеры, теплостойкость которых достигает соответственно 250 и 550 °С.

Полимеры и пластмассы обладают высокой водо- и хемостойкостью. Стойкость к влаге объясняется тем, что многие из них являются водо- и паронепроницаемыми.

Химическое строение и физическая структура обуславливают малую теплопроводность полимеров. Придание пластмассам пенистой структуры позволяет снизить их теплопроводность. Пенопласты также являются хорошими звукоизоляторами.

Коэффициент температурного расширения полимеров весьма значителен, например, у полиэтилена в 21 раз больше, чем у стали.

Многие полимеры обладают высокой светопрозрачностью, например, полиметилметакрилат, который широко используют для остекления.

Прочность пластмасс меняется в широком диапазоне. Так, временное сопротивление колеблется от 30 до 480 МПа. Наибольшей прочностью обладают конструкционные стеклопластики, например, стекловолокнистый анизотропный материал (СВАМ) имеет временное сопротивление растяжению 450 МПа, сжатию – 400 МПа, изгибу – 635 МПа и срезу – 150 МПа.

Модуль упругости наиболее жестких пластмасс сравнительно мал, при растяжении, сжатии и изгибе не выходит за пределы  $4 \cdot 10^3$  МПа.

В табл. 6.1 представлены основные виды полимеров, используемых при производстве строительных пластмасс [12].

Таблица 6.1

Основные виды полимеров, используемых при производстве строительных пластмасс

Наименование группы	Вид, химический состав и строение полимера	Исходные вещества	Внешний вид	Область применения
<b>Класс А. Синтетические полимеры цепной полимеризации</b>				
Этиленопласты	Полиэтилен	Этилен (газ) из попутных нефтяных газов	Твердый, белый материал, слегка просвечивает. В гранулах или порошке	Трубы, сантехизделия, пленки, листы
	Полипропилен	Пропилен (газ) из попутных нефтяных газов	Белый порошок или гранулы	Трубы и пленки
	Полиизобутилен	Изобутилен (газ) из попутных нефтяных газов	Каучукоподобные эластичные листы и пленки	Антикоррозийная защита, полы, гидроизоляция
Винилпласты	Полivinилхлорид (ПВХ или ПВХ)	Кокс, известь, ацетилен, хлористый натрий, водород	Порошок или гранулы белого или слабо-желтого цвета. Листы темно-коричневого цвета жесткие, листы светло-желтого цвета эластичные	Утеплитель, линолеум, пленки, трубы, фитинги. Может применяться в несущих конструкциях

Наименование группы	Вид, химический состав и строение полимера	Исходные вещества	Внешний вид	Область применения
	Полиперхлорвинил	Кокс, известь, ацетилен, хлористый натрий, водород	Порошок или его раствор	Клей, лаки, краски, пленки, ткани
Этинолопласты	Поливинилацетат	Ацетилен и уксусная кислота	Стеклообразный продукт белого цвета или его водная эмульсия сметанообразного вида	Полимерцементбетон, мастичные полы, клей, лаки
Стиропласты	Полистирол	Этилен и бензол (из каменноугольной смолы)	Прозрачные листы, гранулы или белый порошок	Утеплитель, облицовочные плитки, трубы
Акрилопласты	Полиметилметакрилат	Ацетилен и спирт	Прозрачные бесцветные блоки и листы или белый порошок	Светопрозрачные покрытия, облицовочные плитки
<b>Класс Б. Синтетические полимеры конденсационные или ступенчатой полимеризации</b>				
Фенолопласты	Фенолформальдегидная смола	Фенол (из каменноугольной смолы) и формальдегид из метана (природный газ) или из метилового (древесного) спирта	Пресс-порошки темного цвета или жидкие смолы (растворы порошков в спирте и т. д.)	Конструкционные пластмассы, клей, утеплитель, химически стойкие мастики, листы, плитки (арзамит, фаолит, фенолит)
Аминопласты	Мочевинформальдегидные (кабамидные) смолы	Мочевина (аммиак и углекислый газ) и формальдегид	Серовато-белый кристаллический порошок или порошок других оттенков (в зависимости от примесей)	Конструкционные пластмассы и клей
	Меламиноформальдегидные смолы	Меламин (из мочевины) и формальдегид	Порошок различных цветов (в зависимости от примесей)	Конструкционные пластмассы и клей
	Мочевиномеламиноформальдегидные смолы	Мочевина, меламин, формальдегид	Порошок различных расцветок (в зависимости от примесей)	Конструкционные пластмассы и клей

Наименование группы	Вид, химический состав и строение полимера	Исходные вещества	Внешний вид	Область применения
Эфиروпласты	Полиэфирные смолы — глифталы	Глицерин (Г) и фталевая кислота (Ф) из нафталина	В виде клея и лака	Клей, лаки, линолеумы
	Ненасыщенные полиэфирные (в стироле)	Малеиновая кислота (из бензола) и двухатомные спирты (из этилена)	Вязкожидкий раствор смолы в стироле	Изготовление стеклопластиков, клей, лаки, замазки
Эпоксидо-пласты	Эпоксидные смолы	Фенол и эпихлоргидрин	Вязкие жидкости желтого и коричневого цвета	Изготовление стеклопластиков и клеев, пласторастворы и замазки
Амидо-пласты	Полиамидные смолы и волокна; нейлон, капрон	Фенол, ацетилен, азот	Гранулы, порошки, волокна и ткани	Изготовление тканевых оболочек в пневматических конструкциях
Полисилоксаны	Кремнийорганические смолы	Ферросилиций, алкил- и арилгалоиды	Смола, жидкость, пенопласт	Изготовление гидрофобных пленок и добавок, утеплитель
Полиуретаны	Уретано-пласты	Спирты, диаминны, гексаметиленизоцианат	Литьевая смола, волокна, пенопласты	Утеплитель, клей
<b>Класс В. Химически модифицированные природные полимеры</b>				
Эфиры целлюлозы	Целлопласты (этил-, бензил-, нитроацетилцеллюлоза)	Древесная масса, хлопок (природная клетчатка) и кислоты	Листовой материал (целлулоид) в лаках, красках	Линолеум, лаки, краски, клеи, мелкие поделки
Протеино-пласты	Молочный казеин	Молочные продукты	Белый порошок	Клей

Наименование группы	Вид, химический состав и строение полимера	Исходные вещества	Внешний вид	Область применения
Полимеризованные растительные масла	Олифа, тунговое масло	Растительные масла	Масло	Древесные плиты, линолеум
<b>Класс Г. Природные и нефтяные асфальты и смолы*</b>				
Битумопласты	Сплавы асфальтов с битумами и пеками	Асфальты, битум, пек	Темные смолы	Полы, изоляция, гидрофобизирующие добавки и пропитки

\* Природные и нефтяные асфальты и смолы являются высокомолекулярными соединениями, но к полимерам не относятся.

### 6.2. Особенности пожарной опасности строительных пластмасс

Полимеры и пластмассы обладают низкой устойчивостью к температурным воздействиям. Прочность их интенсивно снижается при переходе из твердого состояния в вязкое или в связи с нарушением структуры полимера. Изменения физико-механических свойств при нагревании связаны с необратимыми процессами, и в первую очередь с термоокислительной деструкцией. А так как деструкция происходит при относительно невысоких температурах, то даже при незначительном нагревании наблюдается существенное снижение прочности и изменение других физико-механических свойств. Это определяется видом и количеством входящих в состав компонентов. Практически все полимеры при нагревании теряют прочность, жесткость и увеличивают пластичность. Временное сопротивление в зависимости от температуры интенсивно снижается. Так, у полиэтилена высокого давления (ВД) при нагревании его от  $-60$  до  $+20$  °С оно снижается в 3 раза, а при нагревании до  $+100$  °С – в 19 раз.

У политрифторэтилена (фторопласта-3) при нагревании от  $-60$  до  $+20$  °С предел прочности при растяжении снижается более чем вдвое, а при нагревании до  $+100$  °С – в 13 раз. При нагревании винилпласта от 0 до  $90$  °С предел прочности при растяжении снижается в 7 раз. Прочность полиметилметакрилата (оргстекла) при нагревании снижается более интенсивно, чем у других полимеров. При  $+100$  °С она снижается до нуля. Временное сопротивление растяжению полиамида-6 (капрона) при нагревании

от  $-40$  до  $+100$  °С снижается вдвое. Особенно интенсивное снижение прочности происходит при нагревании выше  $100$  °С.

Пластические массы, по сравнению с полимерами, значительно снижают прочность при нагревании.

Наиболее стабильными при повышении температуры являются свойства кремнийорганических стекловолоконитов, таких как КМС-9.

Одним из показателей термической стойкости материала служит величина потери массы при нагревании. Потеря массы только на 6–8 % вызывает большую потерю прочности. Например, при нагреве до  $250$  °С и последующей 50-часовой выдержке стекловолоконит АГ-4 теряет 8,5 %, а КМС-9 – 2 % своей массы.

Термическая деструкция кремнийорганических стеклопластиков происходит при температуре выше  $350$ – $400$  °С, для полиэфирных стеклопластиков – при  $250$  °С. Стеклотекстолит ФН, изготовленный на основе фенол-формальдегидного полимера, совмещенного с фурфуролом, при нагревании до  $250$  °С снижает прочность при изгибе в 2,2 раза.

Существует мнение, что все полимеры и пластмассы чрезвычайно пожароопасны, поскольку все они легко воспламеняются, интенсивно горят, при пожаре выделяют большое количество дыма и токсичных газообразных продуктов разложения и горения. Это в корне ошибочное представление о пожарной опасности полимерных материалов. Разнообразие видов полимерных материалов требует строго индивидуального подхода к оценке пожарной опасности конкретного материала. Числовые значения параметров, характеризующих пожарную опасность пластмасс, зависят в первую очередь от входящего в их состав полимерного связующего, затем – от вида и количества наполнителей, технологических добавок.

Кроме того, практика, а также многочисленные эксперименты показали, что пожарная опасность пластмасс существенно зависит от характера огневого воздействия на материал, от особенностей его применения и условий окружающей среды.

Ориентировочные данные по группам горючести по ГОСТ 30244–94 [4, 12] представлены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

#### Горючесть некоторых полимерных строительных материалов

Наименование материалов и изделий	Шифр технической документации на материал
<b>А. Горючие материалы (Г3, Г4)</b>	
Плиты древесностружечные (ДСП)	ГОСТ 10632–77
Плиты древесноволокнистые (ДВП)	ГОСТ 4598–74
Стеклопластик полиэфирный листовой	МРТУ 6-11-134-79



Наименование материалов и изделий	Шифр технической документации на материал
Стекло органическое: – конструкционное – техническое	ГОСТ 15809–70 ГОСТ 17622–72
Плиты теплоизоляционные из пенопласта полистирольного	ГОСТ 15583–70
Дивинилстирольный герметик	ТУ 38405-139–76
Эпоксидно-каменнугольная мастика	ТУ 21-27-42–77
Полиуретановые пенопласты: – ППУ-316 – ППУ-317	ТУ 6-05-221-359–75 ТУ 6-05-221-368–75
Поливинилхлоридный пенопласт марки: – ПВ-1 – ПХВ-1	ТУ 6-06-1158–77 ТУ 6-05-1179–75
Прокладки ушлотняющие пенополиуретановые	ГОСТ 10174–72
Пленка полиэтиленовая	ГОСТ 10354–73
Пленка полистирольная	ГОСТ 12998–73
Пергамин кровельный	ГОСТ 2697–75
Рубероид	ГОСТ 10293–82
Прокладки резиновые	ГОСТ 19177–81
Фольгоизол	ГОСТ 204429–75
<b>Б. Горючие материалы (Г1, Г2)</b>	
Плиты теплоизоляционные из пенопластов на основе резольных фенолформальдегидных смол Пенопласт ФРП-1 при $\rho_0 \geq 80 \text{ кг/м}^3$	ГОСТ 20916–75
Эмаль ХП-799 на хлорсульфированном полиэтилене	ТУ 84-618–75
Битумно-полимерная мастика БПМ-1	ТУ 6-10-882–78
Плиты древесно-минеральные	ТУ 66-16-26–83
Стеклотекстолит конструкционный	ГОСТ 10292–74
Плиты и маты теплоизоляционные из минеральной ваты на синтетическом связующем марок 50–125	ГОСТ 95573–82
Маты минераловатные прошивные	ГОСТ 21880–76
Стеклопластик рулонный на перхлорвиниловом лаке	ТУ 6-11-416–76

Наименование материалов и изделий	Шифр технической документации на материал
Листы гипсокартонные (ГКЛ)	ГОСТ 6266–81
Листы гипсоволокнистые (ГВЛ)	ТУ 21-34-8–82
Плиты цементно-стружечные (ЦСП)	ТУ 66-104–83
<b>В. Негорючие материалы (НГ)</b>	
Стеклопор	ТУ 21-РСФСР-2.22–74
Плиты перлитофосфогелевые теплоизоляционные	ГОСТ 21500–76

Исследованиями установлено, что способность распространения пламени по поверхности отделочных материалов зависит от вида материала, ориентации в пространстве (пол, стена, потолок), материала основания (подложки). Наиболее существенное влияние на способность распространения пламени по поверхности материалов оказывает величина теплового воздействия. Для каждого материала существует критическая поверхностная плотность теплового потока ( $K_{ПТП}^{П1}$ ), ниже которого распространение пламени не происходит (табл. 6.3) [12].

Таблица 6.3

Величина  $K_{ПТП}^{П1}$  для некоторых материалов

Материал (положение – «стена»)	$K_{ПТП}^{П1}$ , кВт/м <sup>2</sup>	Группа распространения пламени
Древесноволокнистая плита	3	РП4
Масляная краска МП-21-39	3	РП4
ДБСП – антипирированный (ТУ 400-1-18–84)	20,4	РП1
Бумага «Декор Дуб-59»	26	РП1

В табл. 6.4 представлены данные по дымообразующей способности строительных материалов [12].

Таблица 6.4

Дымообразующая способность некоторых строительных материалов

Наименование материала (изделия из него)	Стандарты или ТУ	Коэффициент дымообразования $D_m$ , м <sup>3</sup> /кг	
		тления	горения
1	2	3	4
<b>А. Материалы с высокой дымообразующей способностью <math>D_m &gt; 500</math>, группа ДЗ [2, 3]</b>			
Обои ПВХ на бумажной основе	ТУ 21-29-11–72	1560	630

Продолжение табл. 6.4

Наименование материала (изделия из него)	Стандарты или ТУ	Коэффициент дымообразования $D_m$ , м <sup>2</sup> /кг	Наименование материала (изделия из него)
Пенопласт ПВХ	СТУ 14-07-41-64	2090	1290
Полистирол	ВТУ 33078-60	280	760
Пенопласт ПСБ-С	ГОСТ 15588-70	1660	770
Пенополистирол ПС-1-600	ГОСТ 15588-70	1610	1050
<b>Пенополиуретаны</b>			
ППУ-3с	ОСТ 5.3025-82	770	530
ППУ-7т	ВТУ 8-98-67	1430	610
Марка ОПС-2	ТУ 6-01-2-509-77	550	470
Плиты древесноволокнистые	ГОСТ 8904-66	760	130
Стеклопластик	ТУ 6-11-10-62-81	640	340
Полиэтилен	ГОСТ 16337-70	1290	890
Пленка ПВХ марки ПДО-15	ГОСТ 24944-81	640	400
<b>Б. Материалы с умеренной дымообразующей способностью <math>D_m = 50 \div 500</math>, группа Д2</b>			
Декоративный бумажно-слоистый пластик (ДБСП)	ГОСТ 9590-76	180	80
Декоративный бумажно-слоистый пластик (ДБСП)	ТУ 400-1-18-79	150	30
Линолеум ПВХ плиточный	ГОСТ 164-75	250	260
Линолеум ПВХ однослойный	ТУ-21-99-90-80	130	440
Стекло органическое, марка СТ-1	ГОСТ 15809-70	310	140
Пленка ПВХ марки ПДО-15	ГОСТ 244944-81	640	400

Окончание табл. 6.4

Наименование материала (изделия из него)	Стандарты или ТУ	Коэффициент дымообразования, $D_m$ , м <sup>2</sup> /кг	Наименование материала (изделия из него)
Плиты древесноволокнистые огнезащитные ППУ-306	ТУ 13-51-2-79, ТУ 203-71	240 70	10 250
Стеклотекстолит КАСТ-В	ГОСТ 10292-74	90	50
<b>В. Материалы с малой дымообразующей способностью <math>D_m &lt; 50</math>, группа Д1</b>			
Пенопласт ФРП	ТУ 6-05-221-304-74	5	5

В табл. 6.5 представлены данные по составу и токсичности продуктов горения некоторых строительных материалов [12].

Анализ гибели людей на пожарах показал, что главной причиной, вызвавшей смерть, является отравление оксидом углерода. Это связано, прежде всего, с тем, что оксид углерода выделяется в больших количествах при термическом разложении и горении практически всех материалов органического происхождения.

Таблица 6.5

Токсичность продуктов горения полимерных материалов

Наименование материала (изделия из него)	Стандарт, ТУ	Выделение продуктов горения, мг/г				Показатель токсичности, г/м <sup>3</sup>	Группа токсичности продуктов горения [2]
		СО	СО <sub>2</sub>	HCN	окислы азота		
Целлюлоза	ТУ-81-04-543-79	60,0	1152	—	—	45,0	T2
Линолеум ПВХ экструзионный	ТУ 400-1-484-73	69,3	777	—	—	61,0	T2
Древесностружечная плита	ГОСТ 10632-77	108	857	—	—	49,0	T2
Стеклопластик ПН-1	ОСТ 6-11-390-75	57,9	1270	0,06	—	63,0	T2
Пенополиуретан ПУ-318	ТУ 6-05-221-469-79	121	944	5,19	12,2	26,0	T3
Пенополистирол	ГОСТ 15588-70	—	—	—	—	39,7	T3
Пенопласт ФРП	ВТУ ВНИИСС № 50-65	539	656	1,56	0,99	6,6	T4
Декоративный бумажно-слоистый пластик (ДБСП)	ГОСТ 9590-76	—	—	—	—	11,2	T4

Кроме того, оксид углерода приблизительно в 300 раз активнее, чем кислород, взаимодействует с гемоглобином крови. Это приводит к образованию карбоксигемоглобина крови вместо оксигемоглобина, который является поставщиком кислорода всем участкам человеческого организма.

### 6.3. Показатели, используемые для сравнительной оценки пожарной опасности строительных пластмасс и в пожарно-технических расчетах

Показатели, охарактеризованные выше, используются для классификации строительных материалов в противопожарном нормировании. Однако полная характеристика пожарной опасности далеко не исчерпывается этими показателями. В настоящее время известен целый ряд показателей, которые также характеризуют горючесть материалов и сопутствующие явления. Эти показатели используют для сравнительной оценки материалов, а также на практике для пожарно-технических расчетов.

Наиболее широко для сравнительной оценки полимерных материалов в целом и строительных пластмасс в частности используют метод определения «предельного кислородного индекса» – КИ. По физическому смыслу предельный кислородный индекс – это минимальное содержание кислорода в воздухе, при котором еще наблюдается устойчивое диффузионное горение [3]. Он может быть выражен в разных относительных единицах – в малых, массовых и объемных долях или в процентах. Чем выше значение предельного кислородного индекса для материала, тем этот материал менее горюч, поскольку для поддержания устойчивого горения требуется большее количество кислорода. Числовые значения кислородного индекса некоторых полимеров, используемых в производстве строительных материалов, представлены в табл. 6.6.

Таблица 6.6

Кислородный индекс полимерных материалов

Материал	КИ, %
Полиформальдегид	15,0
Полиуретановые пены	15,7
Ацетатцеллолоза	16,0–17,0
Полиметилметакрилат	17,3
Полиэтилен	17,4
Полистирол	17,8
Целлолоза	19,0
Эпоксидная смола	19,8

Материал	КИ, %
Полиамид 6,6	24–29
Фенолформальдегид	35,0
Поливинилхлорид	45–49
Политетрафторэтилен	95,0

Из этих данных видно, что подавляющее большинство материалов имеет КИ меньше, чем у фенолформальдегидной смолы (КИ = 35,0), относящейся к группе горючести материалов – Г2, т. е. эти данные согласуются с данными табл. 6.2, показывающими, что подавляющее число полимерных строительных материалов относится к группам материалов по горючести Г3, Г4.

Важным показателем, характеризующим пожарную опасность веществ и материалов, в том числе строительных, является низшая теплота сгорания. Числовые значения теплоты сгорания полимеров измеряются в пределах от 4,6 (политетрафторэтилен) до 46,5 МДж/кг (полиэтилен, полипропилен). Это во многом объясняет тот факт, что пожары в современных зданиях, насыщенных полимерными материалами, развиваются более интенсивно. В табл. 6.7 [11] приведены числовые значения теплоты сгорания для некоторых полимеров и полимерных строительных материалов.

Таблица 6.7

Теплота сгорания полимерных материалов

Наименование	$Q_{ин}$ , МДж/кг
<b>А. Полимеры</b>	
Политетрафторэтилен	4,6
Поливинилхлорид	18,1
Полиамид-6	20,5
Полиэтилентерефталат	22,0
Полиметилметакрилат	26,6
Полистирол	41,4
Полиэтилен	46,4
Полипропилен	46,5
<b>Б. Материалы</b>	
Пенопласт на основе пенополиуретана с антипиренами	15,5
Пенопласт на основе пенополиуретана	24,0
Стеклопластик на эпоксидной основе	16,9

Наименование	$Q_{\text{н}}$ , МДж/кг
ДБСП (ГОСТ 9520-76)	20,3
ДБСП антипирированный	18,6
Линолеум поливинилхлоридный экструзионный	17,9
Линолеум поливинилхлоридный вспененный	23,8
Строительный войлок	20,8
Пенопласт на основе пенополиуретана ППУ-306	28,4

Числовые значения низшей теплоты сгорания используют для расчета пожарной нагрузки в помещениях и температурного режима развития пожара. Массовая скорость выгорания, как и скорость распространения пламени по поверхности, главным образом зависит от вида материала и от интенсивности теплового воздействия на материал. Для строительных материалов этот показатель может изменяться в пределах от  $0,1 \cdot 10^{-2}$  до  $10 \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>2</sup>с (с 1 м<sup>2</sup> поверхности за 1 с может выгореть от  $0,1 \cdot 10^{-2}$  до  $10 \cdot 10^{-2}$  кг материала), выделяя при этом соответствующее количество тепла, дыма и токсичных продуктов горения.

## 7. Теплоизоляционные, акустические, гидроизоляционные материалы и их поведение в условиях пожара

В связи с тем, что данная группа классифицируется не по виду материалов, а по назначению и состоит из материалов различных видов, при изучении их пожарной опасности и поведения в условиях пожара рекомендуется пользоваться соответствующими структурными схемами, приведенными на рис. 1.1 (общая), 3.1, 4.1, 5.1, 6.1.

### 7.1. Основные виды теплоизоляционных и акустических материалов, применяемых в строительстве

Теплоизоляционными называют материалы, обладающие малой теплопроводностью ( $\lambda < 0,21$  Вт/(м·К)) и предназначенные для тепловой защиты зданий, горячих поверхностей оборудования, трубопроводов и камер холодильников.

Они характеризуются пористым строением, малой объемной массой. Поскольку теплопроводность воздуха, заполняющего поры материала, очень мала ( $\lambda_{\text{в}} = 0,02$  Вт/(м·К)), то с увеличением пористости понижается теплопроводность материала. Меньшей теплопроводностью обладают материалы с мелкими закрытыми порами. В крупных открытых порах возникают конвективные потоки воздуха, переносящие тепло, что повышает теплопроводность материала. С увеличением влагосодержания повышается теплопроводность материалов, так как теплопроводность воды значительно выше, чем воздуха.

Применение теплоизоляционных материалов и изделий в строительстве позволяет уменьшить толщину стен.

Классифицируют теплоизоляционные материалы и изделия из них по различным признакам, например, по виду исходного сырья: органические и неорганические. Органические имеют недостатки по сравнению с неорганическими – более высокую гигроскопичность, загниваемость, горючесть, меньшую прочность и теплостойкость.

Материалы, обладающие свойствами поглощать звук, называют звукопоглощающими, а способные изолировать помещения от проникновения звука – звукоизоляционными. Общее название их – акустические материалы.

Акустические материалы классифицируют так же, как и теплоизоляционные: по характеру строения, виду сырья, объемной массе. Звукоизоляционные материалы применяют в виде прослоек в междуэтажных перекрытиях, во внутренних и наружных стенах. К звукоизоляционным материалам и изделиям относят маты и плиты полужесткие стекловатные на синтетическом связующем, древесноволокнистые плиты, а также эластичные пластмассы.

В качестве звукопоглощающих в строительной практике широко используют минераловатные плиты на синтетическом связующем – акминит, акминит.

Акминит – материал из гранулированной минеральной ваты и крахмального связующего с добавками. Его применяют в качестве звукопоглощающей отделки потолков и верхней части стен помещений общественных зданий, объемная масса 320–360 кг/м<sup>3</sup>. Плиты из него по горючести относятся к группам Г1–Г2 (в зависимости от количества связующего вещества) [12].

## 7.2. Гидроизоляционные материалы на битумных и дегтевых вяжущих

Строительные материалы, в состав которых входят битумы или дегти и пеки, называют битумными или дегтевыми.

Все эти материалы представляют собой сложные смеси углеводов и их производных, при нагревании размягчаются, а при охлаждении становятся вязкими или твердыми. Они почти нерастворимы в воде, но хорошо растворимы в органических растворителях. Эти материалы обладают вяжущими свойствами. К ценным свойствам битумных и дегтевых материалов относят высокую водонепроницаемость, стойкость к действию кислот, щелочей, агрессивных жидкостей и газов, а также способность прочно сцепляться с деревом, металлом, камнем (это свойство называют адгезией).

Битумы представляют собой соединения углеводов с кислородом, азотом, серой. Битумы растворимы в сероуглероде, хлороформе, бензоле и других органических растворителях. Различают битумы природные и нефтяные. Природный битум в чистом виде встречается редко, чаще он содержится в породах горных пород – известняков, песчаников. В строительстве природные битумы редко применяются вследствие их высокой стоимости и ограниченности месторождений.

Нефтяные битумы состоят из углерода (до 85 %), водорода (до 15 %), кислорода (до 2 %), серы (до 1,5 %) и ряда примесей других веществ в малых количествах.

**Дегтевые вяжущие.** К этой группе относят сырые дегти, дегтевые масла и пеки.

Сырые дегти – это жидкие продукты сухой перегонки органического вещества – каменного и бурого угля, торфа, древесины и тому подобного сырья, разложение которого происходит при высокой температуре без доступа кислорода. Сырые дегти состоят из углеводов и их сернистых, азотистых и кислородных производных. В зависимости от исходного сырья дегти могут быть древесные, торфяные, сланцевые и каменноугольные. Сырые дегти разгоняют на фракции, которые называют дегтевыми маслами. Получаемый после их отгонки твердый остаток называют пеком.

Битумы, дегти и пеки применяют главным образом в разогретом состоянии, так как в холодном виде они имеют высокую вязкость. Кроме того, их растворяют в органических растворителях. Смеси дегтя и пека используют для производства кровельного толя, приклеивающих и покрасочных дегтевых мастик.

**Битумные и дегтевые эмульсии и пасты.** Эмульсии представляют собой водобитумные или вододегтевые дисперсии (физические растворы). Обычно в эмульсиях содержится около 50 % воды, 45 % битума или дегтя. Преимущество эмульсий – возможность использования их в холодном виде. Битумные и дегтевые материалы в строительстве применяют для окраски кровель, устройства гидро- и пароизоляционного покрытия, приклеивания штучных и рулонных материалов, а также для покрытия поверхностей в целях их гидрофобизации (водоотталкивания – несмачиваемости).

**Кровельные и гидроизоляционные материалы.** В зависимости от применяемого вяжущего кровельные и гидроизоляционные материалы подразделяются на битумные и дегтевые. Между кровельными и гидроизоляционными материалами нельзя провести четкой границы, так как один и тот же материал может быть использован и как кровельный, и как гидроизоляционный или пароизоляционный. По внешнему виду выпускаемые материалы разделяют на рулонные и листовые, мастики, пасты и эмульсии.

Рулонные материалы водонепроницаемы, обладают малой теплопроводностью. Однако они менее долговечны, чем асбестоцементные или керамические и, кроме того, горючи. Для производства всех видов рулонных кровельных битумных и дегтевых материалов в качестве основы применяют кровельный картон, изготавливаемый из смеси растительных волокон, размолотого тряпья, макулатуры и целлюлозы; в его состав могут входить и волокна асбеста. Эти материалы на картонной основе разделяют на 2 вида: покровные и беспокровные. Первые получают путем пропитки основы битумом или дегтем и нанесения на поверхность покрытия из вяжущего с минеральным наполнителем. Вторые изготавливают без минеральных покрытий. К первому виду, например, относится рубероид, ко второму – пергамин. Толь выпускают как покровный, так и беспокровный.

Рубероид – кровельный и изоляционный материал, изготавливаемый путем пропитки кровельного картона мягкими нефтяными битумами и последующего покрытия тугоплавкими нефтяными битумами с обеих сторон.

Стеклорубероид изготавливают путем нанесения на стекловолоконный холст двустороннего битумного покрытия. Основное преимущество стеклорубероида перед обычным – более высокая прочность его основы – стеклохолста по сравнению с картоном.

Пергамин изготавливают из кровельного картона, пропитанного нефтяным битумом. В отличие от рубероидов пергамин не имеет на поверхностях покровного слоя битума и какой-либо посыпки. Применяют пергамин в основном для нижних слоев многослойных кровельных покрытий при укладке на горячих мастиках, а также для пароизоляции.

Гидроизол – беспокровный гидроизоляционный материал, изготовленный путем пропитки асбестовой бумаги нефтяными битумами. Основное его назначение – гидроизоляция подземных сооружений и устройство антикоррозийных покрытий трубопроводов. Гидроизол относят к группе горючих материалов (Г4).

Изол – получают путем смешивания нефтяного битума с резиновой крошкой и асбестовым волокном.

Бризол (битумно-резиновая изоляция) – рулонный гидроизоляционный материал, состоящий из нефтяного битума, дробленой резины, асбеста и пластификаторов. Применяют для защиты от коррозии подземных трубопроводов.

Толь получают путем пропитки специального картона каменноугольным дегтем и пеком. Обе стороны покрывают специальной минеральной посыпкой из сланцевой и асбестовой крошки, кварцевого песка и доменных шлаков. Применяют в основном для покрытия временных объектов строительства, а также гидроизоляции фундаментов, подвалов и прочих подземных сооружений.

**Битумные и дегтевые мастики.** По способу применения их делят на горячие и холодные. Горячие – применяют с предварительным подогревом до 130–180 °С, холодные – без подогрева до температуры воздуха не ниже 5 °С. Мастики всех видов содержат наполнители минеральные и органические. Горячие мастики применяют для приклеивания кровельного ковра к основанию, склеивания отдельных слоев ковра между собой, устройства мастичных кровель, армированных стекловолокнистыми материалами. Холодные мастики обычно растворяют на бензине, лигроине, уайт-спирите, керосине, нефтяных маслах. Применяют их для приклеивания рулонных материалов, устройства защитного покрытия, для гидро- и пароизоляции.

### 7.3. Неорганические теплоизоляционные материалы и их поведение в условиях пожара

**Минераловатные изделия.** Изготавливают на основе различных связующих. Минеральная вата представляет собой теплоизоляционный материал, состоящий из тонких стекловидных волокон, получаемых путем распыления жидкого расплава горных пород или металлургических шлаков.

Марки минеральной ваты характеризуются объемной массой (от 75 до 150 кг/м<sup>3</sup>) и теплофизическими характеристиками (теплопроводность  $\lambda = 0,035 \div 0,046$  Вт/(м·К). Предельная температура применения  $t_{пр} = 600$  °С. Минераловатные плиты изготавливают с добавкой вяжущих (смолы, битума, глины). Плиты на фенольной связке обладают следующими характеристиками: объемная масса 100–175 кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 0,05$  Вт/(м·К);  $t_{пр} = 200$  °С. Плиты на битумной связке: объемная масса – 250–400 кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 0,06 \div 0,08$  Вт/(м·К). Кроме плит из минеральной ваты изготавливают скорлупы

и маты. Горючесть минераловатных изделий зависит от объемной массы, их толщины, вида и количества связующего вещества. При использовании в качестве глины или горючего связующего при содержании до 6 % материал относится к негорючим (НГ). При увеличении содержания горючего связующего до 7–15 % изделия относятся к горючим (Г1, Г2), при содержании более 15 % – к горючим (Г2, Г3) (рис. 7.1).



Рис. 7.1. Образцы минераловатных плит с содержанием связующего менее 15 % после огневых испытаний по ГОСТ 30244–94 (метод П) (группа горючести Г1 – слабогорючие)

Акмигран – акустические плиты из минеральной гранулированной ваты. Состав: минвата – 65 %; глина – 20 %; крахмал – 12 %; парафин и бура – 1 %. Объемная масса 350–400 кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda = 0,098$  Вт/(м·К). Горючий материал (Г1, Г2) применяют как отделочный для подвесных потолков.

**Материалы на основе стекла.** Стекланную вату получают из сырья, служащего для изготовления стекла (SiO<sub>2</sub>, сода и др.), а также из расплава стеклянного боя. Стекланнные волокна прочнее волокон минеральной ваты. Свойства аналогичны. Объемная масса 130 кг/м<sup>3</sup> (в рыхлом состоянии);  $t_{пр} = 450$  °С;  $\lambda < 0,052$  Вт/(м·К). Стекланную вату используют главным образом в виде матов.

Ячеистое стекло – высокопористый ( $\Pi = 80 \div 95$  %) материал, получаемый обжигом при температуре 900–1000 °С смеси стеклянного порошка и газообразователя (известняк, кокс, антрацит). Объемная масса 200–400 кг/м<sup>3</sup>;  $t_{пр} = 800$  °С;  $\lambda = 0,128$  Вт/(м·К);  $R_{сж} = 2 \div 6$  МПа. Производится в виде блоков и плит. Предназначается главным образом для теплоизоляции ограждающих конструкций зданий.

**Материалы на основе вспученного перлита.** Вспученный перлит – сыпучий материал, получаемый путем обжига (1–2 мин) водосодержащей

горной породы при температуре 700–1250 °С. В результате задержки удаления воды при быстром нагревании перлита происходит увеличение его объема в несколько раз (до 20). Объемная масса 75–200 кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 0,4 \div 0,6$  Вт/(м·К);  $t_{пр} = 600 \div 900$  °С – в зависимости от вида связующего в изделиях. Вспученный перлит применяют в сыпучем виде (песок) и в виде изделий. Песок применяют в качестве заполнителя для теплоизоляционных бетонов, растворов, изделий, а перлитовый щебень в качестве пористого заполнителя для теплоизоляционных и легких бетонов.

**Вермикулитовые изделия.** Вспученный вермикулит – сыпучий, зернистый материал, получаемый путем обжига (3–5 мин) при температуре 800–1000 °С минерала вермикулита, представляющего собой природные гидратированные слюды (алюмосиликаты магния). При этом его объем увеличивается в 20 и более раз. Объемная масса 100–200 кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 0,004 \div 0,075$  Вт/(м·К);  $t_{пр} = 1100$  °С.

Применяют как наполнитель в огнезащитных красках и обмазках; так же как и перлит, используется в качестве заполнителя для бетонов и штукатурных растворов.

**Вулканический пепел, песок, пемза, туф.** Пористые горные породы, объемная масса – 400–1400 кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 0,11 \div 0,33$  Вт/(м·К);  $t_{пр} = 1300$  °С. Используют в качестве теплоизоляционных засыпок и набивок, а также в виде плит, блоков и других изделий для теплоизоляции зданий. Кроме перечисленных, выпускают плиты и маты из волокон базальта, кремнезема, используемых в качестве звуко- и теплоизоляционного материала в строительных конструкциях (рис. 7.2).



Рис. 7.2. Звуко- и теплоизоляционные базальтовые плиты в конструкциях фасадных систем

Теплоизоляционные материалы на неорганической основе относятся к группе негорючих материалов. Исключение составляют плиты с использованием органических связующих. Их горючесть зависит от вида и количества связующего. Особенностью поведения в условиях пожара неорганических теплоизоляционных материалов является потеря структурной целостности и снижение, а порой полная утрата теплоизолирующих свойств.

#### 7.4. Пожарная опасность органических теплоизоляционных и гидроизоляционных материалов

Органические теплоизоляционные материалы получают из растительного сырья и отходов: древесных стружек, опилок, костры, камыша, торфа и др., а также на основе полимеров.

Древесноволокнистые плиты (ДВП) изготавливают из целлюлозной массы, выделяемой в процессе переработки древесной щепы, путем формования с применением синтетических смол и закалки. Объемная масса 250 кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 0,75$  Вт/(м·К). Плиты являются сильногорючими (Г4). Легко загораются и горят даже под слоем штукатурки или другого облицовочного материала, что обусловлено наличием достаточного количества воздуха в порах. Следовательно, поверхностные методы огнезащиты для этого материала малоэффективны.

Древесностружечные плиты (ДСтП) изготавливают путем горячего прессования древесных стружек, пропитанных полимерным связующим. Объемная масса 250–400 кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 0,058$  Вт/(м·К). Плиты являются сильногорючими (Г4). Их пожароопасные свойства определяются видом связующего, фракционным составом древесных стружек, а также технологией изготовления плит.

Фибролит применяют для теплоизоляции; объемная масса 300–350 кг/м<sup>3</sup>. Существует еще конструкционный фибролит с объемной массой 400–500 кг/м<sup>3</sup>. Фибролит при объемной массе больше 300 кг/м<sup>3</sup> является материалом нормальногорючим (Г3).

Сырьем для торфоплит служит молодой, еще не перегнивший торф, с большим количеством мха. Плиты получают горячим прессованием. Вяжущего материала для скрепления волокон торфа не требуется, так как при температуре 120–150 °С содержащиеся в торфе коллоидальные вещества склеивают волокна торфа и переходят в нерастворимое состояние. Объемная масса 170–250 кг/м<sup>3</sup> (при влагосодержании 15 %);  $\lambda = 0,058 \div 0,07$  Вт/(м·К);  $t_{пр} < 100$  °С. Торфоплиты сильногорючие (Г4) – горят открытым пламенем и интенсивно переугливаются, что затрудняет тушение пожара. Для защиты от возгорания плиты оштукатуривают. Торфяные теплоизоляционные плиты применяют для изоляции стен и перекрытий. В связи с появлением новых, более эффективных теплоизоляционных материалов, производство плит сокращается.

Строительный войлок изготавливают из низких сортов шерсти с добавлением льняной пакли и клеящих веществ. Объемная масса 150–200 кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 0,06$  Вт/(м·К). Материал имеет группу горючести Г3–Г4. Чаще горит не открытым пламенем, а интенсивно тлеет, выделяя удушливый дым. Понижение горючести достигается пропиткой глиняным раствором.

Пакля представляет собой спутанные волокна отходов обработки льна, конопли и относится к группе горючести Г4. Объемная масса 150 кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 0,06$  Вт/(м·К).

Камышит и соломит – спрессованные плиты из камыша, тростника или соломы. Объемная масса  $200\text{--}250 \text{ кг/м}^3$ ;  $\lambda = 0,08\div 0,11 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Материалы сильногорючие (Г4). Для защиты от возгорания, гниения и грызунов оштукатуривают. Применяют для заполнения стен и перекрытий, для устройства перегородок.

В группу органических теплоизоляционных материалов входят также газонаполненные пластики, которые рассматривались в разд. 6.

Битумные и дегтевые материалы являются горючими (Г3–Г4), поскольку их изготавливают на горючих вяжущих веществах и заполнителях. Более показательными характеристиками для данных материалов являются температуры воспламенения, самовоспламенения и вспышки. В частности, нефтяные битумы имеют следующие характеристики:  $t_{всп} = 212\div 270 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_b = 300\div 351 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{св} = 380\div 397 \text{ }^\circ\text{C}$ . Кроме того, битумы при нанесении на шлаковату склонны к самовозгоранию. Материалы на основе битума имеют следующие характеристики. Изол имеет  $t_b = 345 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{св} = 410 \text{ }^\circ\text{C}$ , бризол –  $t_b = 340 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{св} = 405 \text{ }^\circ\text{C}$ . При температуре  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  изол и бризол склонны к самовозгоранию. Мастика резинобитумная имеет  $t_{всп} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 8. Способы огнезащиты строительных материалов

### 8.1. Исходные сведения об огнезащите органических материалов

Концепции огнезащиты органических материалов основаны на классическом «треугольнике горения» (горючее – окислитель – источник зажигания). Чтобы предотвратить или снизить вероятность возникновения горения материала с последующими процессами (дымовыделение, образование токсичных продуктов), необходимо или исключить один из компонентов «треугольника», или разорвать связи между «углами» физическими и химическими методами.

К физическим методам относятся:

- замедление подвода тепла к материалу за счет теплоизолирующего экранирования его поверхности;
- охлаждение зоны горения в результате увеличения отводов тепла в окружающую среду;
- ухудшение условий переноса реагентов (горючих паров, газов и кислорода) к фронту горения (создание физического барьера между материалом и окисляющей средой).

К химическим методам могут быть отнесены:

- целенаправленные изменения структуры материала, соотношения и состава его материала;
- воздействие химических реагентов – ингибиторов газофазных реакций горения;
- воздействие химических реагентов, влияющих на твердофазные процессы пиролиза.

В ряде случаев снижение горючести материала ведет к снижению его дымообразующей способности и уменьшению выхода токсичных продуктов, однако часто наблюдается увеличение дымообразования и токсичности продуктов горения при его торможении. Например, это характерно при введении в полимеры галогенсодержащих антипиренов. Способы подавления дымообразования и выхода токсичных продуктов базируются на знании механизма этих процессов. В частности, активное дымоподавление происходит при введении в состав полимеров гидратированных минералов. Разлагаясь при высокой температуре, гидроксиды выделяют большое количество влаги, которая адсорбирует частицы дыма.

Снижение выхода токсичных продуктов осуществляют:

- путем простого разбавления;
- изменением хода реакций пиролиза и горения, в результате чего увеличивается выход инертных веществ;
- путем поглощения и связывания токсичных компонентов.



## 8.2. Огнезащита древесины и изделий на ее основе

Способность древесины воспламеняться и гореть является недостатком, во многом сдерживающим более широкое применение ее в строительстве. В то же время многочисленные достоинства древесины вызывают к ней повышенный интерес и стремление к более широкому использованию в качестве декоративно-отделочного и конструкционного материала. Чтобы уменьшить пожарную опасность древесины, связанную с ее способностью воспламеняться и гореть, древесину подвергают огнезащитной обработке. Как показала практика, использование огнезащитной обработки древесины значительно уменьшает вероятность ее воспламенения от маломощных источников, увеличивает время задержки воспламенения при действии более мощных источников и открытого пламени, а также замедляет процесс распространения пламени по поверхности деревянных изделий и конструкций.

В качестве огнезащитных средств для древесины и деревянных конструкций применяют: теплоизолирующие «одежды», огнезащитные покрытия (к числу которых относят краски, обмазки), растворы огнезащитных веществ – антипиренов. Физический механизм огнезащитного действия этих средств основан на разрушении одной из связей в классическом «треугольнике» горения. Так, теплоизолирующие одежды защищают поверхность древесины от действия источника тепла и тем самым препятствуют протеканию процессов терморазложения древесины и воспламенения ее продуктов разложения. В качестве теплоизолирующих (термоизолирующих) одежд используют: штукатурку (мокрую и сухую листовую), другие минеральные и листовые материалы, вспучивающиеся покрытия.

Краски и обмазки выполняют газоизолирующую функцию. Они препятствуют выходу продуктов разложения из древесины и проникновению к ним кислорода воздуха. В результате затрудняются условия образования горючей смеси в газовой фазе.

Антипирены, как правило, оказывают влияние на процессы термоокислительного разложения, воспламенения и горения древесины. В частности, фосфорсодержащие антипирены, которые наиболее широко используют для огнезащиты древесины, усиливают процесс ее карбонизации, что приводит к уменьшению выхода горючих продуктов разложения (рис. 8.1).



Рис. 8.1. Образцы древесины с антипиренами после огневых испытаний по ГОСТ Р 53592-2009

Все применяемые для огнезащиты древесины методы можно разделить на физические, химические и смешанные, а также на поверхностные, глубокие и комбинированные. К физическим методам следует отнести применение теплоизолирующих одежд, инертных красок и обмазок. К химическим методам относят пропитку антипиренами. Применение красок и обмазок, содержащих антипирены, можно отнести к смешанным методам.

Поверхностная пропитка при своей дешевизне и технологичности менее эффективна, чем глубокая пропитка, но позволяет обработать деревянные конструкции непосредственно на строительных объектах. Получить надежную огнезащиту древесины подобным способом крайне сложно. Более глубокое проникновение огнезащитного раствора в поверхностные слои древесины обеспечивается при пропитке методом горяче-холодных ванн, а также обработкой в промышленных аппаратах – автоклавах в режиме последовательного увеличения давления или чередования вакуума и повышенного давления.

В настоящее время разработано большое число огнезащитных пропиточных составов для древесины, которые отличаются друг от друга различным набором и количественным сочетанием низкомолекулярных неорганических и органических соединений со свойствами антипиренов [11]. В рецептуре огнезащитных пропиточных составов часто используют производные фосфорной и фосфоновых кислот: моно- и диаммонийфосфаты или их смеси (аммофос), мочевино-, меламино- и амидофосфаты или фосфонаты. Борная кислота, тетрабораты аммония и натрия, аммонийные соли серной и соляной кислот, хлориды щелочноземельных металлов и металлов переменной валентности, карбонаты натрия и калия – это далеко не полный перечень неорганических веществ, применяемых в виде компонентов пропиточных огнезащитных составов для древесины. Многие из этих веществ обладают полифункциональным действием в механизме снижения пожарной опасности древесины [11].

Вещества, обычно применяемые в пропиточных составах, гигроскопичны и растворимы в воде. Поэтому в атмосферной среде с влажностью более 70 % или при прямом контакте с водой огнезащитная эффективность пропиток древесины может быть частично или полностью потеряна. Для предотвращения этого явления рекомендуется после пропитки древесины дополнительно применять водостойкие укрывные лаки и краски или использовать огнезащитные деревянные материалы только во внутренних помещениях зданий.

**Пропитка древесины антипиренами.** Поверхностная пропитка антипиренами проводится с помощью кисти, краскопульты или методом окунания. При нанесении состава на поверхность древесины строго следуют требованиям технической инструкции по нанесению огнезащитного состава.

Глубокую пропитку древесины антипиренами под давлением производят в специальных заводских установках (рис. 8.2).

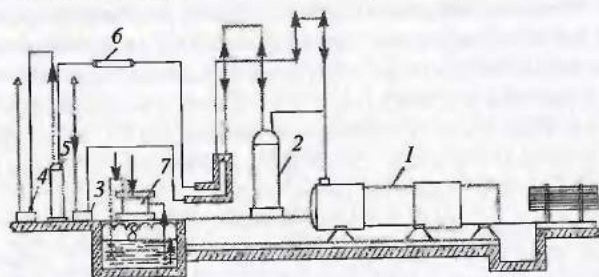


Рис. 8.2. Принципиальная схема установки для глубокой пропитки древесины под давлением:

- 1 – пропиточный цилиндр; 2 – мерник; 3 – компрессор; 4 – вакуум-насос;  
5 – вакуум-аккумулятор; 6 – конденсатор; 7 – резервуар для растворения антипиренов;  
8 – резервуар для пропиточной жидкости

Древесина, подвергаемая глубокой пропитке, должна быть с влажностью, как правило, не более 15%. Древесные породы, значительно отличающиеся по объемной массе, следует пропитывать раздельно, так как при совместной пропитке все породы приходится выдерживать в растворе длительное время, а это ведет к ослаблению механических свойств легкопропитываемых пород. Изделия, значительно отличающиеся по размерам, по той же причине пропитывают раздельно в такой последовательности:

1. В пропиточный цилиндр (автоклав) загружают древесину.
2. Герметизируют аппарат.
3. Включают вакуум-насос и в пропиточном цилиндре постепенно (в течение 30 мин) создают вакуум до 85,5 кПа.
4. В цилиндр подают раствор из резервуара, при этом вакуум не должен снижаться ниже 79,0 кПа.
5. Вакуум-насос выключают и с помощью насоса в пропиточный цилиндр подают раствор под давлением. Постепенно в течение 1 ч давление доводят до расчетного и держат давление до окончания поглощения раствора, момент которого определяется прекращением убывания раствора в мернике. Величина давления и время пропитки зависят от породы древесины и размеров образцов. Например, для таких легкопропитываемых пород, как ольха, бук, береза, длительность пропитки 2–6 ч, а давление 0,8–1,0 МПа; для сосны и кедра 8–12 ч и 1,0–1,2 МПа; для дуба 15–20 ч и 1,5–1,6 МПа. Температуру пропиточного раствора поддерживают 55–60 °С.
6. По окончании пропитки давление постепенно (в течение 20–30 мин) снижают до нуля, в течение 20 мин древесина продолжает оставаться в пропиточном цилиндре для стекания раствора.

7. Выгружают древесину, взвешивают на весах и направляют на сушку. Подсчитывают количество антипиренов (в пересчете на сухое вещество), впитавшихся в древесину. Расчет проводят по формуле

$$K = C \frac{m_k - m_0}{V}, \quad (8.1)$$

где  $K$  – количество антипиренов, впитавшихся в древесину, кг/м<sup>3</sup>;  
 $m_k$  – масса древесины после пропитки, кг;  
 $m_0$  – масса древесины до пропитки, кг;  
 $C$  – концентрация антипиренов в растворе;  
 $V$  – объем древесины, м<sup>3</sup>.

Пропитка древесины антипиренами в горяче-холодных ваннах проводится в специальных емкостях, на дне которых для нагрева и охлаждения прокладывают змеевики, соединенные с соответствующими паровыми или водяными трубопроводами (рис. 8.3).



Рис. 8.3. Схема завода по пропитке древесины антипиренами по способу горяче-холодных ванн

Порядок пропитки: деревянные изделия загружают в бак, подают раствор с температурой 80–90 °С и деревянные детали выдерживают до 24 ч. При этом из пор древесины выходит воздух. Затем в бак снизу подают холодный раствор так, что он вытесняет горячий раствор, который сливают через верх бака. Время выдержки в холодном растворе до 24 ч. По окончании пропитки раствор сливают, древесину выгружают, взвешивают и определяют количество антипиренов, впитавшихся в древесину. Достоинством способа являются простота и несложность оборудования, а недостатки – слабая пропитываемость середины изделий из древесины, ограниченная возможность регулирования количества вводимого пропиточного состава, значительная затрата времени на поглощение раствора.

Физическая сущность процесса пропитки состоит в следующем. При погружении в горячий раствор воздух в порах расширяется и выходит из них – в порах создается разрежение, поэтому в них затем проникает холодный пропиточный раствор. При выборе состава для конкретных условий учитывают их огнезащитную эффективность, а также технологические и эксплуатационные показатели.

Среди используемых в настоящее время огнезащитных средств для древесины особое место занимают покрытия вспучивающегося типа, защитные свойства которых проявляются при действии высоких температур и огня.

Покрытия вспучивающегося типа обязательно содержат важные компоненты: 1 – связующие пленкообразующие вещества, являющиеся одновременно источником образования углеродного каркаса при разложении; 2 – катализаторы реакций образования углеродного скелета; 3 – вспенивающие (вспучивающие) агенты.

Для усиления общего огнезащитного действия вводят разные добавки, способные влиять на технологические, теплозащитные и другие эксплуатационные свойства покрытий. Это наполнители со свойствами антипиренов, загустители, пигменты, стабилизаторы и т. д.

Важным эффектом вспучивающихся покрытий является образование на защищаемой поверхности древесины вспученного теплоизолирующего слоя. Например, у вспучивающихся покрытий на основе терморасширяющихся графитов и органических связующих: мочевиноформальдегидных олигомеров или хлорсульфированного полиэтилена – коэффициенты вспучивания при лучистом тепловом нагреве могут достигать 7 и 25-кратного увеличения толщины. У покрытий на основе ПВХ, терморасширяющегося графита и модифицированного растительного сырья в условиях стандартного температурного режима может наблюдаться вспучивание в 100 и более раз (рис. 8.4).



Рис. 8.4. 120-кратное вспучивание образца огнезащитного покрытия на основе модифицированного растительного сырья после огневого воздействия

Важным условием эффективности и надежности любого метода огнезащитной обработки древесины является строгое соблюдение технологического регламента работ по огнезащите. Как правило, этот регламент изложен в ГОСТ на конкретный метод обработки, а также в технических требованиях и инструкциях. В регламенте указывают материалы и вещества, которые следует применять для обработки, а также их возможные заменители, состав и способ приготовления огнезащитной композиции; оборудование для проведения огнезащитной обработки; нормы расхода состава на единицу поверхности или объема обрабатываемой древесины; количество наносимых слоев и условия сушки при поверхностной обработке; огнезащитную эффективность применяемого метода. Кроме того, в регламенте могут быть оговорены особые условия проведения и применения обработки: влажность обрабатываемой древесины, температура и влажность окружающего воздуха, химическая агрессивность среды и т. д. В частности, большинство огнезащитных красок и обмазок следует наносить при температуре окружающего воздуха не ниже +10 °С и влажности воздуха не более 70 %.

### 8.3. Оценка огнезащитной эффективности покрытий и пропиток

Оценку эффективности проводят по методике национального стандарта ГОСТ Р 53592–2009 «Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний» [13]. Суть оценки заключается в измерении потери массы образца обработанной древесины в результате огневого воздействия. Если среднее арифметическое значение потери массы образцов не превышало 9 %, то покрытие или пропиточный состав относят к I группе средств; если среднее арифметическое более 9, но менее 25 %, то состав относят ко II группе средств; если 25 % и более, то состав не является огнезащитным.

Практика показала, что снижение группы горючести древесины до Г1–Г2 возможно при использовании: глубокой пропитки антипиренами под давлением; глубокой пропитки антипиренами в горяче-холодных ваннах; большинства видов термоизолирующих одежд; вспучивающихся и фосфатных покрытий (рис. 8.5).



Рис. 8.5. Образцы древесины с глубокой пропиткой фосфорсодержащим антипиреном (привес 40 кг/м<sup>3</sup>) после испытаний на группу горючести по ГОСТ 30244–94 (метод II)

Остальные методы, а именно: поверхностная пропитка антипиренами, метод окунания, инертные краски и обмазки – обеспечивают снижение горючести до группы горючести ГЗ [2, 7].

В табл. 8.1 [7] представлены результаты испытаний образцов древесины сосны по методам ГОСТ Р 53592–2009 и 30244–94 (метод II), которые подтверждают высокую огнезащитную эффективность методов глубокой пропитки древесины и применения традиционных вспучивающихся огнезащитных материалов.

Таблица 8.1

Результаты испытаний эффективности огнезащитных составов

Метод испытаний	Устанавливаемые показатели	Древесина сосны без обработки	Результаты испытаний			
			ОФП-9	ВПД	МС 1:1 (глубокая пропитка)	ТХЭФ (поверхностная пропитка)
ГОСТ Р 53592–2009	Потеря массы, %	60	9	6	9	13
ГОСТ 30244–94 (метод II)	Температура дымовых газов, °С	400	155	140	133	412
	Время самостоятельного горения, с	270	0	0	0	90
	Степень повреждения по длине, %	100	27	24	25	100
	Степень повреждения по массе, %	27	2,7	1	2,2	18,2
	Группа горючести	ГЗ–Г4	Г2	Г2	Г1	Г3

#### 8.4. Способы снижения пожарной опасности полимерных строительных материалов (ПСМ)

Особенности огнезащиты полимерных материалов определяются их разнообразием и многокомпонентностью составов. Поскольку горючесть полимерных материалов зависит от соотношения теплоты, выделяемой при сгорании продуктов пиролиза, и теплоты, необходимой для их образования и газификации, то снижение горючести можно обеспечить за счет уменьшения скорости газификации и снижения количества образующихся горючих продуктов следующими методами: введением инертных наполнителей; введением антипиренов; нанесением огнезащитных покрытий.

**Введение наполнителей.** Наполнители используют для получения материалов с заданными свойствами и для снижения их стоимости. Минеральные

наполнители также снижают содержание горючих компонентов, влияют на процесс пиролиза полимеров и изменяют условия тепло- и массообмена при горении.

**Введение антипиренов.** Антипирены делят на два класса: механически совмещающиеся с полимерами и образующие с ними однородную смесь и реакционноспособные соединения, включающиеся (в процессе синтеза или переработки полимерных материалов) в молекулярную структуру полимера.

К инертным антипиренам относятся следующие группы:

1. Неорганические вещества – элементарный фосфор, фосфат или полифосфат аммония, гидроокись алюминия, сульфиды фосфора, бура  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , борат цинка со слабой степенью гидратации  $2\text{ZnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3,3-3,7\text{H}_2\text{O}$ , фторбораты щелочных металлов, сульфаты, нитраты, хлориды алюминия, калия.

2. Низкомолекулярные галоидосодержащие органические соединения ациклического (хлорированные парафины, содержащие более 50 % хлора, пентабромэтан, тетрабромбутан), алициклического (гексабромциклогексан, производные гексахлорциклопентадиена) или ароматического (пентабром- и гексабромбензол, гексабром- и тетрабромбисфенол) строения.

3. Низкомолекулярные фосфорорганические соединения – эфиры фосфорной, фосфоновой или фосфиновой кислот (трикрелилфосфат, трихлорэтилфосфат, бис-(2-бромэтил)-фосфат, трис-(бромметил)-фосфиноксид, соли и основания четвертичного фосфония.

4. Высокомолекулярные галоид- и фосфорсодержащие соединения.

5. Органические азотосодержащие вещества, соединения бора, сурьмы и олова.

К реакционноспособным антипиренам относятся низко- и высокомолекулярные соединения, которые содержат наряду с пламегасящими группами атомов различные функциональные группы, способные к реакциям полимеризации, поликонденсации и полиприсоединения (ненасыщенные двойные связи, гидроксильные, карбоксильные, изоцианатные группы).

Такие антипирены используют в качестве сомономеров и сшивающих агентов при синтезе полимеров или модификаторов. Наиболее известными из них являются галоидосодержащие сомомеры (винилбромид, винилхлорид, монохлорстирол, дибромпропилакрилат или метакрилат), хлорэндиковый, тетрахлор- и тетрабромфталевый ангидрид; хлорэтил; Н-бромвинилфосфонат.

Деление антипиренов на реакционноспособные и инертные является условным, так как пламегасящие добавки, не входя в молекулярную структуру полимеров, могут реагировать с другими компонентами и влиять

на процесс образования полимера. В настоящее время существует несколько теорий, объясняющих снижение горючести полимерных материалов в присутствии антипиренов: химическая, ионная, газовая, тепловая и образования защитного покрытия.

Обуглившаяся после первоначального термического разложения поверхность полимерных материалов может продолжать тлеть в результате выделения большого количества тепла при экзотермической реакции, что приводит к дальнейшему разложению и горению нижележащих слоев материала. Фосфорсодержащие антипирены являются практически единственными веществами, способными предотвратить тление материалов после прекращения пламенного горения и уменьшить возможность вторичного их возгорания, поскольку карбонизированный слой, содержащий фосфор, весьма устойчив к длительному нагреванию. Аналогичное действие оказывают борсодержащие соединения.

В соответствии с общеизвестными гипотезами снижения горючести полимерных материалов антипирены можно условно разделить по механизму их действия на группы:

- разлагающиеся с выделением негорючих газов; горение замедляется из-за повышения нижнего концентрационного предела воспламенения снижения температуры пламени вследствие разбавления горючих продуктов пиролиза негорючими;
- галогеносодержащие, действие которых основано на ингибировании радикальных цепных процессов в газовой фазе;
- образующие защитные пленки и способствующие повышению коксообразования – фосфор- и борсодержащие соединения; горючесть ПСМ снижается вследствие замедления тепло- и массообмена между пламенем и поверхностью полимерных материалов.

Особое положение занимают вещества, сами не являющиеся антипиренами, но усиливающие их действие. Это так называемые синергисты. Типичным представителем этой группы соединений является трехокись сурьмы.

Антипирены должны удовлетворять следующим требованиям: обладать высокой эффективностью пламегасящего действия, хорошо совмещаться с полимерами, оказывать минимальное влияние на физико-механические свойства ПСМ, а также быть нетоксичными, достаточно доступными и относительно дешевыми. В настоящее время нет индивидуальных соединений, удовлетворяющих всем этим требованиям. Поэтому для снижения горючести полимерных материалов применяют комбинацию антипиренов перечисленных выше групп.

Горючесть полимеров обусловлена образованием на ранних стадиях разложения горючих летучих продуктов. Поэтому для создания огнезащищенных

ПСМ используют направленный синтез и модификацию полимеров в целях получения продуктов, имеющих пониженную скорость газификации, образующих карбонизованный продукт и низкий выход горючих продуктов пиролиза.

Применение реакционноспособных антипиренов в принципе можно рассматривать как химическое модифицирование полимеров, так как изменяются химическое строение и свойства макромолекул. Однако химическое модифицирование полимеров – более широкое понятие, под которым понимают модификацию полимеров в целях повышения их термической и термоокислительной стабильности. В этом аспекте проблема снижения горючести полимеров и материалов на их основе тесно связана с проблемой создания термостойких полимеров. Установлено, что при использовании более термостабильных полимеров для получения огнезащищенных полиуретановых материалов требуется вводить антипирены в меньшей концентрации. Повышение термостабильности и соответственно снижение горючести полимеров достигается использованием в синтезе полимеров исходных компонентов, способствующих образованию ароматической сшитой молекулярной структуры. Так, горючесть пенополиуретанов (ППУ) снижается при введении в структуру макромолекул изоциануратных звеньев. Распад изоциануратных циклов протекает при более высоких температурах, чем деструкция уретановых связей. При термообработке ППУ с изоциануратными звеньями образуются стабильные фрагменты с системой сопряженных двойных связей. Поэтому ячеистая структура пенопластов с изоциануратными группами не разрушается при нагреве до 600 °С.

Огнезащитные покрытия, наносимые на полимерные материалы, имеют в настоящее время ограниченное применение. Чаще всего такие покрытия используют для снижения пожарной опасности строительных материалов из древесины, древесностружечных и древесноволокнистых плит, пенопластов и стеклопластиков.

Принципиально новым направлением создания полимерных материалов пониженной горючести является синтез полимеров с минимальным содержанием органической части, а также термостойких полимеров, выделяющих при разложении негорючие и нетоксичные летучие продукты.

## 9. Пути совершенствования нормирования пожаробезопасного применения материалов в строительстве

### 9.1. Перспективы противопожарного нормирования

Наблюдающиеся за последние годы рост числа пожаров, гибели людей и увеличение материального ущерба связаны не только с повышением энергонасыщенности и ростом количества пожарной нагрузки зданий, но и с несоответствием противопожарного нормирования современному уровню научно-технического прогресса в строительстве. Поэтому в нашей стране и за рубежом все большее внимание уделяется разработке научно обоснованных норм пожарной безопасности. В частности, наметился постепенный отход от однозначных решений и рекомендаций и переход к нормированию исходных данных, пользуясь которыми можно было бы/более гибко решать задачи пожарной безопасности в соответствии с особенностями проектируемого объекта. При этом основной целью противопожарного нормирования и, следовательно, основополагающим принципом является обеспечение безопасности людей при пожаре. Кроме того, противопожарное нормирование предполагает достижение следующих целей:

- добиться при соблюдении требуемого уровня пожарной безопасности максимальной экономии в строительстве;
- обеспечить процесс проектирования, при котором проектировщику предоставляется возможность широкого выбора альтернативных решений;
- получить возможность проводить количественный анализ пожарной безопасности объектов.

В нашей стране и за рубежом ведутся работы по созданию комплексного метода оценки уровня пожарной безопасности здания, где, как правило, учитывается вероятность возникновения пожара, время эвакуации, плотность дыма, токсичность продуктов горения, физические возможности людей, знание людьми обстановки, количество и показатели пожарной опасности материалов пожарной нагрузки. Количественные характеристики этих факторов представляют собой условные коэффициенты, полученные методом экспертных оценок или установленные при анализе статистических данных. В частности, национальное бюро стандартов США определило, что из существующих методик наиболее предпочтительной для оценки пожарной безопасности зданий является методика, которая наиболее полно и достоверно учитывает факторы, влияющие на интенсивность развития пожара и продолжительность эвакуации людей из зданий. Здесь необходимо учитывать не только конструктивные и объемно-планировочные решения, но и инженерно-технические, организационные мероприятия противопожарной защиты.

Основной принцип противопожарного нормирования может быть применен и к строительным материалам. Однако формулировка принципа – важнейший, но недостаточный этап в противопожарном нормировании, так как принцип носит самый общий характер. Для его конкретной реализации необходим переход к более частным и более конкретным критериям пожаробезопасного применения материалов в строительстве. Нормирование применения материалов с учетом их воспламеняемости и скорости распространения пламени решается в различных странах применительно к конкретным типам помещений с учетом видов материалов, функционального назначения помещений, наличия противопожарных инженерных систем, способов крепления материалов к конструкциям, назначения конструкций и т. д.

Основной недостаток этого подхода, особенно для зданий с разнобразной пожарной нагрузкой, это то, что требуется достаточно точное прогнозирование поведения материала при пожаре, т. е. умение предвидеть ту пожарную опасность материала, которую он вероятнее всего будет проявлять при пожаре.

### 9.2. Предлагаемый подход к оценке возможности применения пожароопасных материалов

В связи с возможностью образования при пожаре неограниченного числа факторов (условий) и их сочетаний, влияющих на пожарную опасность материала, возникает необходимость установления приоритетности тех или иных факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на степень их пожарной опасности, и в то же время, обладающих достаточной степенью вероятности появления.

С этой целью в нашей стране и за рубежом уделяется большое внимание исследованиям динамики развития пожара с использованием методов системного анализа и теории вероятности. Необходимость такого рода исследований обусловлена значительным разбросом множества случайных факторов, которые оказывают существенное влияние на процесс развития пожара, образование ОП и эвакуацию людей из зданий.

Перспективным является системный подход в выборе строительного материала с учетом эксплуатационных характеристик, в том числе его пожарной опасности. Выбор материала осуществляют поэтапно. Сначала учитывают функциональное назначение здания, затем определяют необходимый уровень требований качественно и на последнем этапе количественно. Впоследствии этот уровень преобразуют в конкретные требования к материалам, которые могут иметь научное обоснование или выражаться с помощью экспертных оценок. Особенность подхода заключается в том, что значения других параметров при выборе материала не должны быть ниже установленных предельных значений для зданий данного функционального назначения.

Методология противопожарного нормирования, действующая в нашей стране, имеет в качестве обобщенного критерия «вероятность воздействия опасных факторов на человека», значение которого, равное  $10^{-6}$ , установлено в ФЗ-123 [2]. В соответствии с этим стандартом, система противопожарной защиты объекта должна обладать таким уровнем, при котором обеспечивается требуемая безопасность людей при пожаре, т. е. выполняется условие

$$P_{\phi} \leq P_n, \quad (9.1)$$

где  $P_n$ ,  $P_{\phi}$  – соответственно нормативная и фактическая (расчетная) вероятности воздействия ОФП в год на одного человека.

Математическая модель расчета вероятности воздействия опасных факторов пожара на человека основана на методе построения и анализа «дерева опасностей» в системе «объект – человек – пожар». Расчет вероятности проводится, исходя из вероятности одновременного появления всех случайных факторов, характеризующих условия возникновения и развития пожара, состояния системы противопожарной защиты и ситуации, при которой человек не смог своевременно эвакуироваться или спастись при пожаре.

Необходимо также учитывать, что вероятность основных событий может быть вычислена по статистическим данным. Исключение составляют лишь события, связанные с определением своевременности эвакуации и спасения людей. Для определения этих вероятностей предложено следующее условие безопасности, которое можно представить как частный критерий безопасности:

$$\tau_{н.эв} + \tau_{эв}^p \leq \tau_{\text{ОФП}}^{\text{бл}}, \quad (9.2)$$

где  $\tau_{н.эв}$  – время от момента возникновения пожара до начала эвакуации;

$\tau_{эв}^p$  – время движения людей по эвакуационным путям в безопасную зону;

$\tau_{\text{ОФП}}^{\text{бл}}$  – время блокирования эвакуации под воздействием ОФП.

Таким образом, обеспечение пожарной безопасности здания должно быть основано на рассмотрении системы «здание – пожар – человек», критерием эффективности которой является уровень безопасности людей в здании при пожаре. Поэтому структурно-логическая модель пожаробезопасного применения материалов должна основываться на всестороннем анализе опасных для людей ситуаций, которые могут возникнуть из-за применения этих материалов в здании. В дальнейшем это позволит, исходя из условий и критериев пожаробезопасного применения, устанавливать требуемую пожаробезопасность (или предельно допустимую пожарную опасность) материалов для рассматриваемой области применения (рис. 9.1).



Рис. 9.1. Структурная схема определения требуемой пожарной безопасности строительных материалов (СМ)

Рассматривая звено «человек», можно отметить, что в настоящее время безопасность людей в здании при пожаре во многом определяется тем, насколько своевременно с момента начала пожара завершается эвакуация людей из зон, где в период развития пожара могут возникнуть опасные для жизни людей ситуации. В этом направлении разрабатываются соответствующие мероприятия противопожарной защиты, направленные на минимизацию продолжительности эвакуации. Обеспечение успешной эвакуации является необходимым, но не всегда достаточным условием обеспечения полной безопасности людей при пожаре. Это обусловлено тем, что во многих случаях из-за различных субъективных и объективных причин часть людей не успевает своевременно эвакуироваться из здания и их спасение затем производят пожарные подразделения. Возникновение таких ситуаций может быть связано с отказом или несоответствием требованиям безопасности систем обнаружения, оповещения и управления эвакуацией людей, а также из-за ограниченной способности людей к самостоятельной эвакуации или недооценке ими степени опасности развития пожара. Поэтому с точки зрения полного обеспечения безопасности людей в здании

Опасные ситуации для людей при пожаре

Место применения ПСМ в здании	Факторы образования опасных ситуаций				
	Блокирование эвакуации людей из				Распространение пламени
	помещения очага пожара	других помещений этажа пожара	помещений других этажей	помещений смежных секций здания	
Помещение	Воспламенение	Образование ОФП в объеме коридора	Образование ОФП в объеме коридора	Образование ОФП в системе вестибюля	В смежное помещение
Коридор	Воспламенение СМ				По этажу
Лестничная клетка	Воспламенение СМ				По этажам секции
Вестибюль	Воспламенение СМ				По зданию

при пожаре, противопожарное нормирование применения материалов в строительстве должно быть направлено не только на обеспечение безопасности эвакуации, но и на предотвращение гибели людей, которые не эвакуировались из здания. Изложенное указывает на то, что критериями пожаробезопасного применения материалов в здании могут являться следующие:

– применение строительных материалов не должно приводить к блокированию эвакуации людей из здания при пожаре;

– применение строительных материалов не должно приводить к распространению огня по зданию, что может стать причиной гибели людей, своевременно не эвакуировавшихся при пожаре.

В соответствии с этими критериями условия безопасности применения материалов имеют следующий вид:

$$\tau_{\text{отд}}^{\text{отд}} \geq K_6 \tau_{\text{эв}}; \quad \tau_{\text{р.п}}^{\text{отд}} \geq K_6 \tau_{\text{т.п}}, \quad (9.3)$$

где  $\tau_{\text{р.п}}^{\text{отд}}$ ;  $\tau_{\text{отд}}^{\text{отд}}$  – соответственно время от начала развития пожара до блокирования эвакуации и распространения огня по отделке в здании, мин;

$\tau_{\text{т.п}}$ ;  $\tau_{\text{эв}}$  – соответственно время от начала развития пожара до завершения эвакуации и спасения людей пожарными подразделениями, мин;

$K_6$  – коэффициент безопасности.

При пожаре в здании, независимо от места его возникновения, эвакуация людей по отношению к месту применения материала может проходить по следующим трем вариантам: 1) эвакуация проходит через помещения, где применен материал; 2) эвакуация проходит через помещения, конструктивно связанные с первыми; 3) спасение людей проходит по наружным пожарным лестницам или их спасение осуществляется пожарными подразделениями. Для каждого из этих вариантов имеются свои условия образования опасных для людей ситуаций. В первом случае к блокированию эвакуации приводит возгорание материала. Во втором – образование в объеме эвакуационного пути опасных для людей уровней токсичности окружающей среды, повышенной температуры или потери видимости на пути движения. В третьем – быстрое распространение огня по зданию. В связи с этим предельно допустимая пожарная опасность отделочного материала (ПСМ) должна устанавливаться с учетом всех возможных для людей ситуаций (табл. 9.1).

В частности, применение отделки в коридоре жилого этажа гостиной может стать причиной образования следующих трех опасных для людей ситуаций:

1. Блокирование эвакуации людей с этажа пожара из-за воспламенения отделки:

$$\tau_{\text{восп}}^{\text{отд}} < \tau_{\text{эв}}^{\text{эт}}, \quad (9.4)$$

где  $\tau_{\text{восп}}^{\text{отд}}$  – время от начала пожара до воспламенения отделки, мин;

$\tau_{\text{эв}}^{\text{эт}}$  – время от начала пожара до завершения эвакуации людей с этажа пожара, мин.

2. Блокирование эвакуации людей с других этажей здания из-за выгорания отделки и образование в объеме эвакуационного пути опасных факторов пожара: потери видимости, повышенной токсичности продуктов горения и температуры окружающей среды:

$$\tau_{\text{ОФП}}^{\text{отд}} < \tau_{\text{эв}}^{\text{зд}}, \quad (9.5)$$

где  $\tau_{\text{ОФП}}^{\text{отд}}$  – время от начала пожара до образования опасных факторов пожара, мин;

$\tau_{\text{эв}}^{\text{зд}}$  – время от начала пожара до завершения эвакуации людей из здания, мин.



3. Угроза воздействия огня и других ОФП на людей, которые своевременно не эвакуировались и остались в здании. Причиной возникновения этой ситуации может стать способность отделки распространять пламя по поверхности. Условие возникновения ситуации можно представить в следующем виде:

$$\tau_{p,n}^{отл} < \tau_{min}, \quad (9.6)$$

где  $\tau_{p,n}^{отл}$  — время от начала пожара до распространения пожара, мин;

$\tau_{min}$  — время от начала пожара до прибытия пожарных подразделений и начала тушения пожара, мин.

Общая структурно-логическая модель нормирования предельно допустимой пожароопасности применения отделок для коридоров зданий гостиниц представлена на рис. 9.2.

В соответствии с этой моделью отделка должна обладать достаточно низкой с точки зрения предотвращения опасных для людей ситуаций способностью к воспламенению, распространению пламени по поверхности, а также образованию дыма, токсичных продуктов горения и тепла.

Предельно допустимые значения этих свойств определяются в зависимости от расчетных ситуаций, которые складываются в коридоре за время эвакуации людей и до начала тушения пожара подразделениями пожарной охраны.

Как известно, развитие пожара в здании носит случайный характер и зависит от множества стохастических и детерминированных факторов. Поэтому для обеспечения необходимой и достаточной безопасности применения отделок необходимо требования к ним устанавливать, исходя из максимального температурного режима пожара, который он может достигать в период наибольшей продолжительности эвакуации и времени начала тушения пожара в зданиях гостиниц.

Режим развития пожара может быть установлен расчетом или при проведении натуральных экспериментальных исследований, в которых должны быть реализованы самые благоприятные условия развития пожара, характерные для зданий гостиниц. Эти условия могут быть установлены при анализе проектных решений и по статистическим данным возникновения и развития пожаров.



Рис. 9.2. Структурно-логическая модель пожаробезопасного применения полимерных строительных материалов (ПСМ)

1. Строительные материалы : учебник / под ред. В. Г. Микульского. – М. : Изд-во АСВ, 1996.
2. Федеральный закон от 22 июля 2008 года № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (в ред. Федерального закона от 10.07.2012 № 117-ФЗ с изменениями от 13.07.2014 г.) // НСИС ПБ, Национальная справочно-информационная служба в области пожарной безопасности. – № 1 (55). – 2015.
3. ГОСТ 12.1.044–89\* (ИСО 4589-84) Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения // НСИС ПБ, Национальная справочно-информационная служба в области пожарной безопасности. – № 1 (55). – 2015.
4. ГОСТ 30244–94 Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть // НСИС ПБ, Национальная справочно-информационная служба в области пожарной безопасности. – № 1 (55). – 2015.
5. ГОСТ 30402–96 Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость // НСИС ПБ, Национальная справочно-информационная служба в области пожарной безопасности. – № 1 (55). – 2015.
6. ГОСТ Р 51032–97 Материалы строительные. Метод испытания на распространение пламени // НСИС ПБ, Национальная справочно-информационная служба в области пожарной безопасности. – № 1 (55). – 2015.
7. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре : учебник. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2013. – 364 с.
8. ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования (ИСО 834-75) // НСИС ПБ, Национальная справочно-информационная служба в области пожарной безопасности. – № 1 (55). – 2015.
9. Ройтман В. М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / В. М. Ройтман. – Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. – 385 с., ил.
10. Яковлев А. И. Расчет огнестойкости строительных конструкций / А. И. Яковлев. – М. : Стройиздат, 1988.
11. Асеева Р. М. Горение древесины и ее пожароопасные свойства : монография / Р. М. Асеева, Б. Б. Серков, А. Б. Сивенков. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2010. – 262 с.
12. Демехин В. Н. Пожарная опасность и поведение строительных материалов в условиях пожара / В. Н. Демехин, В. М. Лукинский, Б. Б. Серков. – СПб. : ООО «Ковэкс», 2002. – 142 с.
13. ГОСТ Р 53292–2009 Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний // НСИС ПБ, Национальная справочно-информационная служба в области пожарной безопасности. – № 1 (55). – 2015.
14. Зенков Н. И. Строительные материалы и их поведение в условиях пожара / Н. И. Зенков. – М. : ВИПТШ МВД СССР, 1974. – 176 с.

Введение .....	3
<b>1. Основные свойства строительных материалов и процессы, происходящие в них в условиях пожара.....</b>	<b>5</b>
1.1. Внешние и внутренние факторы, определяющие поведение строительных материалов в условиях пожара.....	5
1.2. Основные свойства, характеризующие поведение строительных материалов в условиях пожара.....	7
1.2.1. Физические свойства.....	7
1.2.2. Механические свойства.....	10
1.2.3. Теплофизические свойства.....	14
1.2.4. Свойства, характеризующие пожарную опасность строительных материалов.....	17
1.3. Сущность физико-химических процессов, приводящих к изменению свойств строительных материалов в условиях пожара .....	20
1.3.1. Физические процессы.....	20
1.3.2. Химические процессы .....	24
1.3.3. Физико-химические процессы.....	25
<b>2. Методы исследования поведения строительных материалов в условиях пожара .....</b>	<b>27</b>
2.1. Методы исследования механических характеристик строительных материалов при их нагревании.....	27
2.2. Классификационные (аттестационные) методы оценки показателей пожарной опасности строительных материалов.....	28
2.2.1. Метод испытания на горючесть для отнесения материалов к негорючим или к горючим (метод I) [4].....	29
2.2.2. Метод испытания горючих материалов для определения их групп горючести (метод II) [4].....	30
2.2.3. Метод испытания материалов на воспламеняемость [5].....	32
2.2.4. Метод испытания материалов на распространение пламени по поверхности [6].....	34
2.2.5. Метод экспериментального определения коэффициента дымообразования твердых веществ и материалов [3].....	36
2.2.6. Метод экспериментального определения показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов.....	39
<b>3. Каменные материалы, их поведение в условиях пожара и способы повышения стойкости к его воздействию.....</b>	<b>42</b>
3.1. Особенности состава, строения и свойств природных каменных материалов.....	43
3.1.1. Основные виды породообразующих минералов.....	43
3.1.2. Основные виды горных пород.....	45
3.2. Основные виды искусственных каменных материалов, их характеристики и особенности.....	47
3.2.1. Основные сведения о неорганических вяжущих веществах .....	48
3.2.2. Бетон.....	51

3.2.3. Асбестоцемент.....	53
3.2.4. Силикатные материалы автоклавного твердения.....	54
3.2.5. Керамические материалы и минеральные расплавы.....	54
3.3. Общие закономерности и специфические особенности поведения каменных материалов в условиях пожара.....	55
3.3.1. Особенности поведения природных каменных материалов в условиях пожара.....	56
3.3.2. Особенности поведения неорганических вязких веществ при нагревании.....	59
3.3.3. Особенности поведения искусственных каменных материалов при нагревании.....	62
3.4. Способы повышения стойкости каменных материалов к воздействию пожара.....	69
<b>4. Металлы, сплавы, их поведение в условиях пожара и способы повышения стойкости к его воздействию.....</b>	<b>70</b>
4.1. Особенности состава, строения и свойств строительных сталей и алюминиевых сплавов.....	71
4.1.1. Стали, применяемые в строительстве.....	73
4.1.2. Алюминиевые сплавы.....	79
4.2. Поведение металлов и сплавов в условиях пожара.....	80
4.3. Способы повышения стойкости металлов к воздействию пожара.....	87
<b>5. Древесина и ее пожарная опасность.....</b>	<b>88</b>
5.1. Строение, химический состав и свойства древесины.....	89
5.2. Применение древесины в строительстве.....	93
5.3. Физико-химические процессы, определяющие поведение древесины и материалов на ее основе при нагревании и в условиях пожара.....	95
<b>6. Пластмассы и их пожарная опасность.....</b>	<b>102</b>
6.1. Основные виды пластмасс, применяемых в строительстве, особенности их строения и свойств.....	103
6.2. Особенности пожарной опасности строительных пластмасс.....	108
6.3. Показатели, используемые для сравнительной оценки пожарной опасности строительных пластмасс и в пожарно-технических расчетах.....	114
<b>7. Теплоизоляционные, акустические, гидроизоляционные материалы и их поведение в условиях пожара.....</b>	<b>117</b>
7.1. Основные виды теплоизоляционных и акустических материалов, применяемых в строительстве.....	117
7.2. Гидроизоляционные материалы на битумных и дегтевых вяжущих.....	118
7.3. Неорганические теплоизоляционные материалы и их поведение в условиях пожара.....	120
7.4. Пожарная опасность органических теплоизоляционных и гидроизоляционных материалов.....	123

<b>8. Способы огнезащиты строительных материалов.....</b>	<b>125</b>
8.1. Исходные сведения об огнезащите органических материалов.....	125
8.2. Огнезащита древесины и изделий на ее основе.....	126
8.3. Оценка огнезащитной эффективности покрытий и пропиток.....	131
8.4. Способы снижения пожарной опасности полимерных строительных материалов (ПСМ).....	132
<b>9. Пути совершенствования нормирования пожаробезопасного применения материалов в строительстве.....</b>	<b>136</b>
9.1. Перспективы противопожарного нормирования.....	136
9.2. Предлагаемый подход к оценке возможности применения пожароопасных материалов.....	137
<b>Литература.....</b>	<b>144</b>

*Учебное издание*

БИГУЕВ Борис Жунусович  
РОЙТМАН Владимир Миронович,  
СЕРКОВ Борис Борисович,  
СИВЕНКОВ Андрей Борисович,  
СТЕБУНОВ Сергей Викторович

## Свойства и поведение строительных материалов в условиях пожара

Учебное пособие

Редактор *А. В. Бондаренко*  
Технический редактор *Е. А. Пушкина*  
Корректор *Н. В. Федькова*

Подписано в печать 16.12.2016. Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Печ. л. 9,25. Уч.-изд. л. 7. Бумага офсетная.  
Тираж 400 экз. Заказ 552

Академия ГПС МЧС России  
129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4