



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

**СТРОИТЕЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

Издательство МИСИ – МГСУ

# КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*Рекомендовано*

*Учебно-методическим советом НИУ МГСУ в качестве учебного пособия  
для обучающихся по направлению подготовки 08.03.01 Строительство  
(№ 01 от 05.02.2019)*

ISBN 978-5-7264-2163-6

© Национальный исследовательский  
Московский государственный  
строительный университет, 2020

Москва  
2020

УДК 678  
ББК 30.36  
К63

*Авторы:*

В.Г. Соловьев, В.Ф. Коровяков, О.А. Ларсен, Н.А. Гальцева

*Рецензенты:*

кандидат технических наук, доцент *В.А. Ушков*,  
доцент кафедры строительных материалов НИУ МГСУ;  
кандидат технических наук *Д.А. Ильин*, технический специалист  
ИТЦ ООО «ТЕХНОНИКОЛЬ — Строительные Системы»

К63 **Композиционные материалы в строительстве** [Электронный ресурс] : [учебное пособие для обучающихся по направлению подготовки 08.03.01 Строительство] / [В.Г. Соловьев и др.] ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, кафедра технологии вяжущих веществ и бетонов. — Электрон. дан. и прогр. (3,8 Мб). — Москва : Издательство МИСИ – МГСУ, 2020. — Режим доступа: <http://lib.mgsu.ru/>. — Загл. с титул. экрана.  
ISBN 978-5-7264-2163-6 (сетевое)  
ISBN 978-5-7264-2162-9 (локальное)

В учебном пособии дана характеристика композиционных материалов, приведены сведения об их классификации, применяемом сырье и особенностях технологических схем изготовления. Освещена сущность процессов, протекающих при изготовлении строительных материалов, представлены присутствующие им физико-механические свойства и области применения.

Для обучающихся по направлению подготовки 08.03.01 Строительство.

*Учебное электронное издание*

© Национальный исследовательский  
Московский государственный  
строительный университет, 2020

Редактор *Е.Б. Махиянова*  
Корректор *Л.А. Попова*  
Компьютерная верстка *В.Е. Гурьянчевой*  
Дизайн первого титульного экрана *Д.Л. Разумного*

Для создания электронного издания использовано:  
Microsoft Word 2010, ПО Adobe Acrobat

Подписано к использованию 26.03.2020. Объем данных 3,8 Мб.

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Московский государственный строительный университет»  
129337, Москва, Ярославское ш., 26

Издательство МИСИ – МГСУ.  
Тел.: (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75, (499) 183-97-95.  
E-mail: [ric@mgsu.ru](mailto:ric@mgsu.ru), [rio@mgsu.ru](mailto:rio@mgsu.ru)

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	6
1.1. Основные понятия.....	6
1.2. Классификация композиционных материалов по геометрии и параметрам наполнителя .....	8
ГЛАВА 2. КОМПОЗИЦИОННЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА. ВЯЖУЩИЕ НИЗКОЙ ВОДОПОТРЕБНОСТИ .....	13
ГЛАВА 3. ВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	15
3.1. Общие положения .....	15
3.2. Упругие и прочностные свойства волокнистых композитов .....	16
3.3. Материалы матрицы .....	17
3.4. Фибробетоны .....	18
3.5. Разновидности армирующих волокон.....	20
3.6. Сталефибробетоны.....	22
3.7. Бетоны, армированные неметаллическими волокнами.....	30
ГЛАВА 4. БЕТОНОПОЛИМЕРЫ.....	36
4.1. Основные понятия.....	36
4.2. Бетонполимеры.....	36
4.3. Полимербетоны .....	37
ГЛАВА 5. ДРЕВЕСНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ.....	40
5.1. Общие понятия .....	40
5.2. Влияние древесных наполнителей на структурообразование минеральных вяжущих .....	41
5.3. Фибролит.....	41
5.4. Арболит .....	46
5.5. Цементно-стружечные плиты .....	48
5.6. Гипсоволокнистые листы .....	54
5.7. Гипсостружечные плиты .....	57
5.8. Системы КНАУФ .....	58
5.9. Строительные композиты на основе магнезиальных вяжущих и древесных наполнителей.....	60
ГЛАВА 6. ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	63
6.1. Классификация древесно-полимерных композиционных материалов.....	63
6.2. Сырьевые материалы .....	63
6.3. Клееная фанера.....	64
6.4. Древесностружечные плиты .....	69
6.5. Древесноволокнистые плиты .....	72
ГЛАВА 7. ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	74
7.1. Общие понятия и положения .....	74
7.2. Композитная арматура.....	76
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	85

## ВВЕДЕНИЕ

Композиционные материалы (композиты) позволяют эффективно использовать индивидуальные свойства своих компонентов. В последние годы значительно возросло количество исследований и разработок в этой области, что связано с возможностью получения материалов с новыми функциональными свойствами. Новый термин в материаловедении — «композиционный материал» — был предложен в середине прошлого века для определения, изучения и прогнозирования свойств конструкционных материалов. Данное понятие объединяет в себе многообразие видов материалов, состоящих из двух или нескольких разнородных компонентов. По этой причине большинство материалов, существующих в природе или созданных человеком, можно считать композиционными. Однако принципиальные различия в механизмах упрочнения, обусловленные химическим составом, физико-механическими свойствами, формой и размерами составляющих, не позволяют рассматривать все двух- и многокомпонентные системы с единых позиций и вызывают необходимость в определении современного толкования понятия «композиционные материалы» применительно к новым материалам.

История использования человеком композиционных материалов насчитывает много веков, а его представление о них заимствовано у природы. Особенно широкое распространение композиты получили в строительстве. Так, сравнение прочности двух стержней одинакового сечения, изготовленных из бамбука и древесины, показывает, что прочность и гибкость первого приблизительно в 2 раза больше. Такие исключительные свойства на протяжении длительного времени нашли применение при изготовлении шестов для прыжков, корабельных мачт и т.д.

Существует обширная группа материалов, сочетающих в себе необычные свойства разнородных материалов. Например, железобетон — искусственно созданный на рубеже XIX–XX веков материал — позволяет сооружать элементы пролетов мостов, балок, оболочек, воспринимающих значительные изгибающие нагрузки, конструкции которых из обычного бетона категорически невозможны ввиду недостаточной трещиностойкости при воздействии даже достаточно небольших изгибающих нагрузок.

Чаще всего композиционные материалы представляют собой металлические или неметаллические конструкционные материалы, в которых, как правило, присутствуют усиливающие компоненты. В качестве таких компонентов могут выступать нити, волокна или хлопья более прочного материала.

Применение дисперсного армирования в бетонах открывает широкие возможности для снижения материалоемкости, стоимости и трудоемкости конструкций по сравнению с традиционными бетонами, способствуя улучшению прочностных характеристик изгибаемых, сжатых, растянутых элементов конструкций, увеличивая трещиностойкость, ударную вязкость, износостойкость, термическое сопротивление и другие характеристики.

# ГЛАВА 1. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

## 1.1. Основные понятия

**Композиционными материалами (КМ)** называют искусственные многокомпонентные материалы, состоящие из матрицы и наполнителя. При этом между составляющими компонентами композита имеется четкая граница раздела фаз.

Прочностные, эксплуатационные и другие свойства композиционного материала зависят от соотношения трех основных параметров:

- прочности армирующих компонентов;
- свойств и жесткости матрицы;
- межфазового взаимодействия на границе между связующим и наполнителем.

*Основными признаками композитов* принято считаться следующие:

- композиционный материал должен быть создан человеком;
- композиционный материал (или композиция) образуется за счет объемного сочетания составляющих его компонентов.
- композит должен обладать свойствами, которыми не обладает ни один из составляющих его материалов;
- разнородные компоненты композита не должны химически взаимодействовать между собой;
- композиционный материал должен состоять не менее чем из двух разнородных компонентов с четкой границей раздела между ними.

По структуре и расположению компонентов композиционные материалы могут быть каркасными, матричными, слоистыми и иметь комбинированную структуру.

Композиционные материалы также подразделяют по геометрии (форме) армирующего компонента, схеме его расположения в матрице и механизму упрочнения.

**Условия, необходимые для создания композиционных материалов.** При выборе материалов для изготовления композита необходимо, чтобы между компонентами присутствовала физико-химическая совместимость, которая сводится к следующему:

- при изготовлении и в условиях эксплуатации компоненты, входящие в состав композита, не должны образовывать химических соединений или твердых растворов, которые могут снизить прочность армирующих элементов;
- для выбранных компонентов следует обеспечить прочную связь между матрицей и наполнителем;
- различие между коэффициентами термического расширения компонентов не должно вызывать разрушения или растрескивание какого-либо из них в составе композита;
- отсутствие остаточных деформаций при асимметричном цикле нагружения, способствующих снижению прочности композита;
- полученный композиционный материал должен иметь лучшие показатели по удельной прочности и жесткости, чем монолитные материалы, используемые для создания самого композита в данных условиях;
- вновь созданный композит должен быть экономически более эффективным, чем существующие материалы.

*Композиционные материалы различают:*

- по материалу матрицы;
- армирующим компонентам;
- геометрии компонентов, их структуре и их расположению в композите;
- методам изготовления.

Наиболее широко применяется классификация композитов по материалу матрицы. На рис. 1.1 приведена классификация композитов по виду применяемого материала матрицы. В соответствии с этим композиционные материалы подразделяются на металлические и неметаллические. К *металлическим* относятся композиты на металлической матрице, к *неметаллическим* — цементные, керамические, полимерные, углеродистые материалы.

Композиты с матрицей смешанного типа носят название *полиматричных композиционных материалов* (рис. 1.2, а).

Композиционные материалы, состоящие из трех и более компонентов и содержащие в своем составе наполнители различной природы, называются *гибридными (полиармированными) композитами* (рис. 1.2, б).

В композиционных материалах существенная роль отводится матрице, которая выполняет следующие функции:

- обеспечивает монолитность композита;
- выполняет укрепляющую функцию;
- фиксирует взаимное расположение армирующих компонентов (волокон, дисперсных частиц) и форму изделия;
- выполняет функцию равномерного распределения действующих напряжений по всему объему материала на наполнитель, а также их перераспределение при разрушении части волокон.

В качестве матрицы и наполнителя применяются самые разнообразные по природе и происхождению материалы. Существуют композиты на основе металлов, керамики, стекол, цементного камня, углерода, полимеров и других материалов. Матрица (связующее) является пластичной, а наполнитель (армирующие компоненты) обладает высокой прочностью и жесткостью.

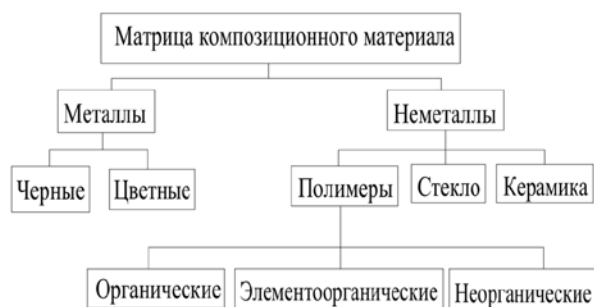


Рис. 1.1. Классификация композиционных материалов по материалу матрицы

**Методы получения композиционных материалов.** Основные требования, предъявляемые к любому методу изготовления композитов, состоят в максимальном сохранении исходной прочности армирующих компонентов, обеспечении необходимой ориентации в матрице и создании условий для прочного соединения исходных компонентов.

Для композитов на металлической матрице существует три основных метода синтеза компонентов, зависящих от исходного агрегатного состояния матрицы:

- твердофазный (прокатка, диффузионная сварка, горячее динамическое прессование, сварка взрывом и магнитно-импульсным способом);
- жидкофазный;
- осаждение;
- комбинированный.

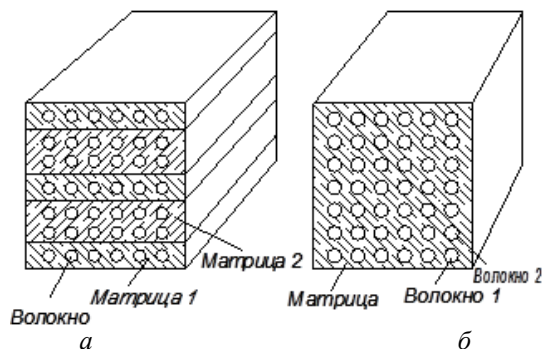


Рис. 1.2. Схемы армирования композитов:  
а — полиматричный композит; б — гибридный (полиармированный) композит

В процессе проведения *твердофазного синтеза* в качестве матрицы используются листовые материалы или материалы в порошкообразном состоянии. При этом создание композита осуществляется в пресс-формах посредством совместного прессования порошкообразного связующего с равномерно распределенными в нем дискретными волокнами (металлическими, керамическими, нитевидными кристаллами).

Недостаток этого метода заключается в трудностях с приданием направления ориентации армирующих волокон. Так, например, для придания определенной ориентации армирующих компонентов в виде нитевидных кристаллов их предварительно покрывают металлом (никелизация), после чего смесь волокон с матрицей из алюминиевого сплава помещают в магнитное поле, в котором волокна располагаются по направлению силовых линий.

Достоинством метода являются высокие прочностные показатели получаемых изделий, минимальные допуски по размерам изделий, сокращение времени спекания, поскольку процессы прессования и спекания совмещаются. Недостатком метода является быстрый износ пресс-форм и невысокая производительность процесса.

*Жидкофазные методы* изготовления композитов являются высокопроизводительными, применяются при изготовлении изделий сложной формы с возможностью использования жгутовых и тканевых армирующих материалов, позволяют полностью автоматизировать технологический процесс производства. Методы предусматривают получение металлических композитов путем совмещения армирующих волокон с расплавленной матрицей. К ним относятся методы пропитки волокон жидкими матричными сплавами и метод направленной кристаллизации. Недостатками данных методов являются высокая температура получения, присутствие межфазных взаимодействий и тщательный выбор компонентов.

*Метод осаждения* позволяет получать многослойные композиции, обладающие высокой прочностью. При производстве металлических композитов методом осаждения — напыления матричный металл наносят на волокна из растворов солей или других химических соединений при помощи плазменного или вакуумного напыления.

*Комбинированный метод* получения композитов представляет собой сочетание двух и более указанных методов.

## 1.2. Классификация композиционных материалов по геометрии и параметрам наполнителя

В зависимости от **геометрии армирующих элементов наполнителя и их взаимного расположения** свойства композитов могут быть одинаковыми во всех направлениях — изотропными (дисперсно-упрочненные КМ) и различными — анизотропными (КМ, упрочненные непрерывными волокнами, ориентированными в определенных направлениях). *Изотропные композиты* обладают одинаковыми свойствами во всех направлениях. К ним относятся композиты с порошкообразными наполнителями. К числу изотропных условно можно отнести композиты с дискретными частицами. Свойства материалов с *анизотропными* свойствами зависят от направления расположения армирующего компонента, которые могут быть однонаправленными, слоистыми и трехмерно-направленными.

Характер расположения составляющих элементов, как в направлениях действующих нагрузок, так и по отношению друг к другу, т.е. их упорядоченность, оказывает большое влияние на свойства композита. Композиты, обладающие высокой прочностью, имеют, как правило, высокоупорядоченную структуру.

Композиты в зависимости от **геометрических размеров** наполнителя подразделяют (табл. 1.1):

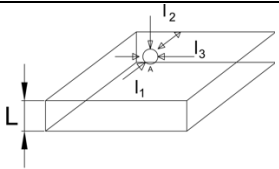
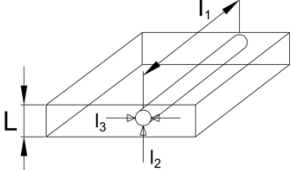
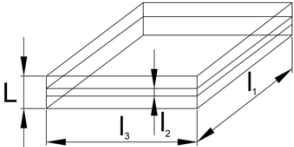
- на нульмерные или дисперсно-упрочненные — упрочненные частицами с весьма соизмеримо малыми размерами в трех измерениях;
- одномерные — армированные волокнами, с малыми размерами в двух направлениях и значительно превосходящим размером в третьем измерении;
- двумерные — армированные наполнителем в виде слоев, листов, пластин или тканей с двумя размерами, соизмеримыми с размером композиционного материала и значительно превосходящими третий размер.



Применение наполнителей различной формы и природы способствует улучшению физических, технологических и эксплуатационных свойств композитов. Например, для увеличения прочности связи между волокнами на основе углерода или стекла в полимерное связующее вводятся частицы карбида кремния. Для повышения модуля упругости композиционных материалов с полимерной матрицей совместно вводятся волокна на основе стекла и бора.

Таблица 1.1

Классификация наполнителя по форме

Компонент	Геометрия компонента	Соотношение размеров
Нульмерный		$\frac{l_1}{L} \ll 1; \frac{l_2}{L} \ll 1; \frac{l_3}{L} \ll 1;$
Одномерный		$\frac{l_1}{L} \sim 1; \frac{l_2}{L} \ll 1; \frac{l_3}{L} \ll 1;$
Двумерный		$\frac{l_1}{L} \sim 1; \frac{l_2}{L} \ll 1; \frac{l_3}{L} \sim 1;$

Наполнители композитов могут выполнять различные функции. В зависимости от **назначения** наполнители подразделяют на *армирующие* (усиливающие механические свойства) и *технологические* (изменяющие фрикционные, электрические, теплофизические и другие свойства).

Варьируя объемное содержание составляющих компонентов можно получать композиционные материалы с заданными свойствами: высокой прочностью, жаростойкостью, высоким модулем упругости, абразивной стойкостью, а также необходимыми магнитными, диэлектрическими, радиопоглощающими показателями.

В зависимости от схемы армирования или расположения армирующих компонентов в матрице (рис. 1.3) различают следующие виды композитов.

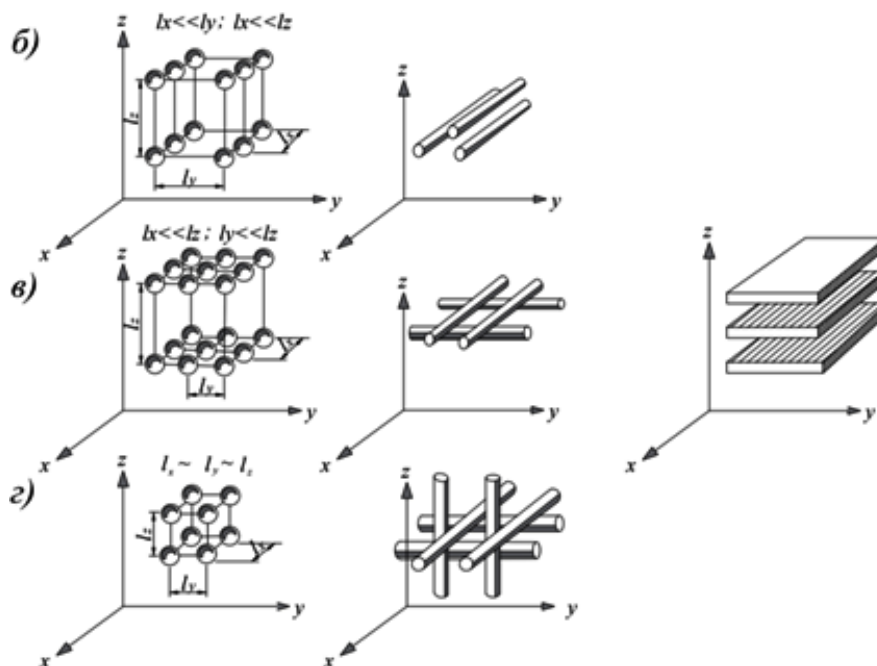


Рис. 1.3. Классификация композитов по схеме армирования:

*a* — одноосное армирование; *b* — двухосное армирование; *в* — трехосное армирование

Композиты с одноосным (линейным) расположением армирующих компонентов в матрице (рис. 1.3, *a*), представляющих собой нульмерные и одномерные наполнители в виде частиц, волокон, нитей, ориентированных цепочек нитевидных кристаллов. При этом расстояние между нульмерными наполнителями вдоль одного направления значительно меньше, чем по двум другим, т.е.  $l_x \ll l_y; l_x \ll l_z$ . Содержание нульмерных наполнителей в композитах по объему составляет 1–5 %. При одноосном армировании одномерные наполнители располагаются параллельно друг другу.

Композиты с двухосным (плоскостным) расположением армирующих компонентов (рис. 1.3, *б*) в виде нульмерных, одномерных и двумерных наполнителей, представляющих собой частицы, волокна, фольгу, маты. При этом, в случае армирования нульмерными и одномерными наполнителями, они располагаются параллельно друг другу со значительно меньшим расстоянием между собой в пределах плоскости, чем между самими плоскостями, т.е.  $l_x \ll l_z; l_y \ll l_z$ . Содержание нульмерных армирующих компонентов по объему может достигать 15–16 %. Одномерные наполнители располагаются параллельно в границах данной плоскости, но по отношению к другим плоскостям обычно под разными углами. Двумерные наполнители расположены параллельно друг другу.

Композиты с трехосным (объемным) армированием (рис. 1.3, *в*), которые характеризуется отсутствием какого-либо направления в распределении наполнителя. Для армирования используют нульмерные и одномерные наполнители. Располагаются нульмерные наполнители на одинаковом расстоянии от друга во всех трех измерениях в пределах одного порядка, т.е.  $l_x \sim l_y \sim l_z$ . При этом их содержание в матрице по объему может превышать 15 %. Одномерные наполнители располагаются в трех и более пересекающихся плоскостях.

На рис. 1.4 представлены возможные схемы армирования композитов.

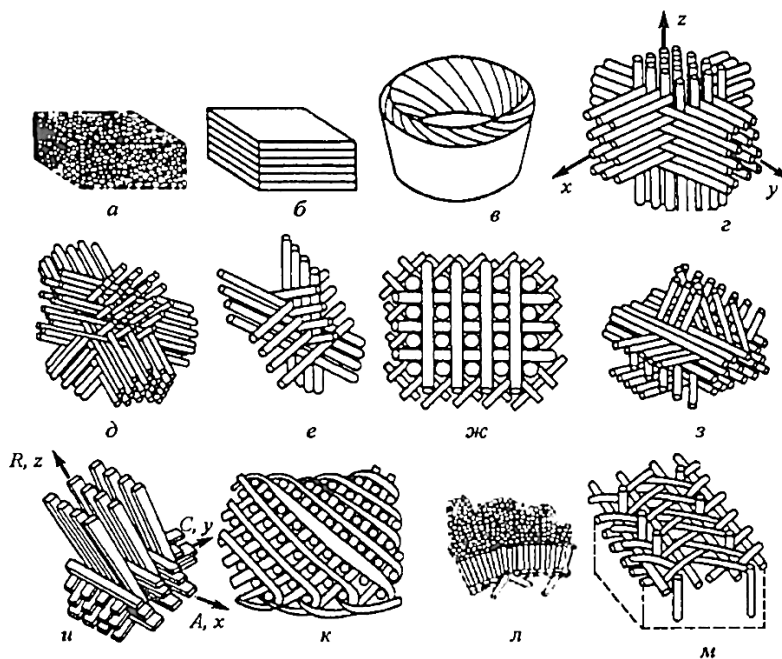


Рис. 1.4. Схемы армирования композитов:

*a* — хаотическая; *б* — слоистая; *в* — розеточная; *z—z* — ортогональное армирование; *u* — аксиально-радиально-окружная; *к* — аксиально-спиральная; *л* — радиально-спиральная; *м* — аксиально-радиально-спиральная

В зависимости от характера взаимодействия с материалом матрицы наполнители подразделяют на инертные и активные (упрочняющие). Механизм взаимодействия матрицы с наполнителем определяется химической природой этих материалов и состоянием поверхности наполнителя. Наибольший эффект усиления достигается при возникновении между наполнителем и материалом матрицы химических связей или значительного адгезионного

взаимодействия. Наполнители, способные к такому взаимодействию с матрицей, называются *активными*. *Инертными* являются наполнители, не способные к этому взаимодействию. Последние применяют для облегчения переработки или снижения стоимости изделий.

По виду армирующего компонента композиционные материалы разделяются:

- волокнистые — армированные дискретными или непрерывными волокнами, нитевидными кристаллами;
- армированные дисперсными частицами с неопределенной, кубической, шарообразной или чешуйчатой формой;
- слоистые, созданные путем прессования или прокатки разнородных материалов, армированные непрерывными и дискретными пластинами;
- нанокompозиты, полученные путем введения в состав наночастиц размером 1–100 нм

**Волокнистые композиты** представляют собой материал, армированный волокнами. Основой волокнистых наполнителей являются дискретные (короткие) или непрерывные элементарные волокна, которые могут использоваться самостоятельно или для производства других форм волокнистых материалов: нитей, ровингов, лент, тканей, холстов и т. п.

При создании волокнистых композитов применяются высокопрочные стеклянные, углеродные, борные и органические волокна, волокна растительного происхождения (льноволокно, древесные опилки), металлические проволоки, а также волокна и нитевидные кристаллы ряда карбидов, оксидов, нитридов и других соединений. разнообразные волокнистые материалы.

Введение волокон в состав композита, даже в небольших количествах, приводит к существенному улучшению механических характеристик материала. Значительное влияние на свойства композитов оказывает ориентация волокон, их размер и концентрация в объеме материала.

Предел прочности волокнистых композиционных материалов прямо пропорционален пределу прочности волокон и их объемному содержанию. Прочность композиций с прерывистыми волокнами определяется механическими свойствами и длиной волокон, прочностью связи между компонентами, а также способностью матрицы сопротивляться сдвигающим напряжениям.

*Основное назначение матрицы* в волокнистых композиционных материалах состоит в следующем:

- объединении волокон в единое целое;
- равномерном разобщении их между собой;
- предохранении волокон от воздействия внешней среды;
- перераспределении напряжений между волокнами.

Волокнистые композиционные материалы изготавливают двумя способами:

- 1) упрочняющая фаза в виде тончайших волокон образуется непосредственно при направленной кристаллизации эвтектических сплавов в случае применения металлической матрицы;
- 2) упрочняющие волокна сначала подготавливаются отдельно, а затем вводятся в матрицу.

**Композиты с дисперсными наполнителями.** В большинстве случаев дисперсные или порошковые наполнители рассматриваются как дешевые добавки или заполнители объема. Дисперсные наполнители отличаются формой частиц: сферические, пластинчатые, чешуйчатые, игольчатые и др.

Наполнители могут быть органического (порошки древесной муки, крахмала) и неорганического (тальк, мел, каолин, стекло) происхождения.

Для получения *полимерных КМ* обычно применяют твердые наполнители:

- тонкодисперсные с частицами зернистой формы (сажа, диоксид кремния, древесная мука, крахмал, мел, каолин и др.);
- пластинчатой формы (тальк, слюда, графит и др.);
- полые сферы из стекла шарообразной формы с функцией уменьшения веса композитов.

В композиционных материалах на полимерной матрице дисперсные наполнители (сажа, графит, порошки металлов, рубленые волокна, порошки металлов и ферриты) применяются для придания материалу специальных электрофизических свойств.

Еще одной группой дисперсных наполнителей, которые все чаще используются в настоящее время, являются полимеры в форме дисперсных частиц.

Композиционные материалы с применением дисперсных наполнителей на металлической матрице носят название *дисперсно-упрочненных*. В этом качестве применяются дисперсные частицы тугоплавких фаз: оксиды, борида, нитриды, карбиды, такие как  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , BN, SiC.

Дисперсно-упрочненные композиты на металлических матрицах относятся к классу *порошковых композитов*, содержат частицы размером 0,01–0,1 мкм с расстоянием между ними 0,05–0,5 мкм. Объемное содержание наполнителя может достигать 1–15 % и зависит от схемы армирования. Дисперсно-упрочненные композиты представляют собой материал, состоящий из матрицы, воспринимающей основную нагрузку и являющейся основным несущим элементом, и дисперсного наполнителя, упрочняющего материал и оказывающего сопротивление движению дислокаций при нагружении, которое препятствует развитию пластической деформации. Прочность дисперсно-упрочненных композитов тем выше, чем больше сопротивление упрочняющих частиц, и зависит от дислокационной структуры, формируемой в процессе пластической деформации при изготовлении изделий.

Прочность дисперсно-упрочненных композиционных материалов зависит от объемного содержания наполнителя, равномерности его распределения, дисперсности наполнителя и расстояния между его частицами. Сопротивление сдвигу возрастает с уменьшением расстояния между частицами:

$$\sigma = Gb/l,$$

где  $G$  — модуль сдвига;

$b$  — межатомное расстояние;

$l$  — расстояние между частицами.

Дисперсно-упрочненным композитам присущи свойства изотропии. Этим они отличаются от волокнистых композитов. В металлургии дисперсно-упрочненные композиты получают механическим и химическим смешиванием порошков, поверхностным или внутренним окислением, механическим легированием.

**Слоистые композиционные материалы** представляют собой сочетание матрицы и наполнителя, расположенного слоями. Примерами таких материалов являются триплекс, фанера, клееные деревянные конструкции и слоистые пластики.

**Нанокompозиты** являются новым классом композиционных материалов, в составе которых присутствуют частицы нанометрового диапазона. Размеры частиц, входящих в состав, находятся в диапазоне от 1–100 нм.

## ГЛАВА 2. КОМПОЗИЦИОННЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА. ВЯЖУЩИЕ НИЗКОЙ ВОДОПОТРЕБНОСТИ

Появление в 1980-х годах эффективных химических модификаторов, регулирующих свойства бетонных смесей, позволило существенно улучшить физико-механические свойства получаемых бетонных композитов. Использование таких добавок значительно повысило не только прочностные показатели бетонов до 100–120 МПа, но и способствовало развитию технологии бетонирования особо сложных конструкций, позволяющей применять обычные и высокопрочные бетоны.

Отличительной особенностью **вяжущих низкой водопотребности (ВНВ)** является повышенная дисперсность и низкая водопотребность. В составе присутствует органический модификатор, вводимый при совместном помолу клинкера или домолу промышленного цемента. Он участвует в синтезе цементного камня для повышения прочности, плотности гидратированного вяжущего.

Структура и свойства многокомпонентных вяжущих определяются выбором необходимых исходных материалов, а также их соотношением, дисперсностью и активностью. Так, необходимым условием создания ВНВ является обязательное присутствие в его составе органического модификатора, выполняющего роль интенсификатора помола. Целью совместного помола клинкера, органического компонента, вводимого в определенном количестве, и минеральных добавок в виде отходов производства (отходы горно-обогачительных комбинатов (ГОК), отсевов дробления заполнителей из твердых горных пород, активных минеральных добавок естественного и искусственного происхождения), является не только получение вяжущего заданной дисперсности, но и в обеспечении физико-химического взаимодействия между активной поверхностью клинкерных частиц и органической добавки вплоть до полного связывания. В результате этого возникают и завершаются твердофазовые реакции между клинкерными полидисперсными минералами портландцемента (ПЦ) и пластификатором, образуются своеобразные специфические, достаточно надежно фиксированные органо-минеральные оболочки вокруг зерен цемента.

В технологии вяжущих материалов под механической активацией обычно подразумевается их домол в мельницах различных типов. При этом возникает эффект механохимической активации, связанной с состоянием поверхности частиц, в частности с деформацией кристаллической структуры поверхностного слоя, приводящей к снижению статического электрического поля и уменьшению теплоты смачивания поверхности. Цементный камень и бетон на основе активированного цемента отличаются меньшим содержанием крупных капиллярных пор и, как следствие, пониженной водопроницаемостью цементного камня и повышенной стойкостью к различным агрессивным воздействиям.

По мере повышения дисперсности процесс измельчения материала приобретает обратимый характер. Одновременно с диспергированием происходит агломерация частиц, обусловленная наличием свободных связей, возникающих при механическом воздействии на измельчаемый материал. Многочисленными исследованиями установлено, что при помолу цемента в шаровой мельнице до очень высоких величин удельной поверхности, наступает момент, после которого она больше не увеличивается, несмотря на продолжающийся расход энергии на помол. Этот процесс сопровождается уменьшением удельной поверхности.

Вводимый в больших количествах органический модификатор модифицирует значительную часть активной поверхности зерен цемента, ослабляет электростатические силы взаимного притяжения отдельных частиц, что предотвращает их агломерацию.

Органические модификаторы, вводимые при помолу, оказывают также значительное влияние на кинетику и характер реакции процессов гидратации. Отличительной особенностью цементного теста на основе ВНВ является существенное замедление процессов структурообразования и твердения в первые 4–6 ч с последующей интенсивной потерей тиксотропных свойств и преобладанием процессов кристаллизации. Установлено, что индукционный период структурообразования цементного теста на основе исходного портландцемента составляет 2–2,5 ч с момента приготовления в то время, как для ВНВ он занимает 3–5 ч.

В табл. 2.1 приведены результаты исследований процесса гидратации ВНВ методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) и кинетики набора прочности камня нормального твердения исходного портландцемента и ВНВ на его основе.

Таблица 2.1

**Основные свойства вяжущих низкой водопотребности**

Продолжительность твердения, сут	Предел прочности при сжатии, МПа		Степень гидратации алита, %		Содержание Ca(OH) <sub>2</sub> , %	
	Исходный ПЦ с НГ = 26 %	ВНВ-100 с НГ теста 16,5 %	Исходный цементный камень	ВНВ-100	Исходный цементный камень	ВНВ-100
1	32,0	82,4	52,3	26,7	2,8	0,9
3	57,5	124,5	59,0	34,0	4,5	1,2
7	72,6	156,7	66,7	40,0	6,3	1,7
28	81,7	184,0	71,4	52,0	8,2	2,6
90	90,3	196,2	78,0	56,2	9,1	2,8
180	98,5	205,0	81,6	64,3	9,8	3,1

*Примечание.* НГ — нормальная плотность цементного теста.

Несмотря на относительно низкий уровень степени гидратации ВНВ, прочность камня на его основе значительно выше, чем контрольного цементного камня, что объясняется типом новообразований и характером структуры.

Преимущества, которые устанавливает применение ВНВ в технологии тяжелого бетона по сравнению с традиционным портландцементом, в том числе высокопрочным:

- снижение водопотребности бетонных смесей на 30–50 %;
- повышение водоудерживающей способности бетонных смесей, их сохраняемости и стойкости к расслоению при транспортировке;
- значительное увеличение прочности бетона;
- повышение интенсивности твердения бетонов как в естественных условиях, так и при тепловлажностной обработке;
- повышение эксплуатационных свойств изделий и конструкций, в том числе плотности, морозостойкости и сульфатостойкости.

# ГЛАВА 3. ВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

## 3.1. Общие положения

В последние годы исследования и инновации в разработках высокоэффективных и многофункциональных строительных материалов строительной отрасли достигли значительных объемов. Современные строительные материалы должны быть не только экологически безопасными, энергосберегающими с точки зрения защиты окружающей среды, но и обладать высокими прочностными показателями, повышенной долговечностью и износостойкостью. Наиболее полно этим требованиям соответствуют дисперсно-армированные волокнистые композиты, с равномерным, заданным или произвольно ориентированным во всем объеме матрицы волокном. К ним относятся фибробетоны, фиброкерамы, фибролаты и т.д.

Присутствие высокопрочных волокон в фибробетонах на основе минеральных вяжущих способствует повышению физико-механических показателей, снижению расхода сырьевых материалов при их производстве, экономии времени на изготовление, уменьшению толщины конструкций с сохранением заданных прочностных характеристик по сравнению с традиционными видами бетона и железобетона

При воздействии внешних нагрузок на фибробетон высокопрочные волокна воспринимают основные напряжения и обеспечивают жесткость и прочность композита. При этом необходимо обеспечить равномерное распределение волокна по всему объему пластичной матрицы, доля которого в объеме может достигать 75 % и более.

В соответствии с составом, происхождением и основными свойствами различают следующие виды волокон:

- высокомодульные (стальные, углеродные, стеклянные и др.) и низко модульные (полипропиленовые, вискозные и др.);
- природные (асбестовые, базальтовые, шерстяные и др.) и искусственные (вискозные, полиамидные и др.);
- металлические (стальные) и неметаллические (синтетические, минеральные).

Армирующие волокна композитов должны удовлетворять комплексу эксплуатационных и технологических требований:

- модуль упругости больше, чем у матрицы композита;
- химическая стойкость в щелочной среде бетонов, обеспечивающая отсутствие разрушения;
- объем выпуска волокон должен соответствовать обеспечению объемов производства изделий из фибробетонов;
- минимальная стоимость.

Существует гипотеза, основанная на том, что в дисперсно-армированных бетонах при использовании волокнистых наполнителей матрица композита передает приложенную нагрузку за счет касательных сил равномерно распределенным в ней волокнам, действующим по поверхности раздела фаз. Основную долю напряжений будет воспринимать волокнистый наполнитель если его модуль упругости больше модуля упругости цементной матрицы. При этом общая прочность композита прямо пропорциональна объемному содержанию волокон.

Для армирования композиционных слоистых материалов применяются непрерывные волокна с отношением длины волокна к диаметру  $l/d = \infty$  и дискретные короткие волокна с хаотичным расположением в матрице с отношением длины к диаметру  $l/d = 10^1 - 10^3$ .

В качестве армирующего компонента в волокнистых композитах могут применяться волокна органического происхождения, стеклянные, металлические, углеродные, борные, а также кристаллы ряда карбидов, оксидов, нитридов и других соединений в виде волокон и нитей. В свою очередь основой волокнистых наполнителей являются непрерывные или дискретные (прерывные) элементарные волокна, которые могут использоваться самостоятельно или для производства других форм волокнистых материалов: нитей, проволочек, жгутов, сеток, тканей, лент, холстов и т.п.

### 3.2. Упругие и прочностные свойства волокнистых композитов

В волокнистых композитах наполнитель воспринимает механические нагрузки, определяя его основные свойства: прочность, деформативность, жесткость.

Необходимым условием синтеза композита является совместимость армирующего волокнистого наполнителя с материалом матрицы, достижение прочной связи между волокном и матрицей с сохранением исходных значений механических свойств исходных компонентов.

Волокна композита должны соответствовать требованиям по прочности, плотности, жесткости, химической стойкости в определенном температурном интервале и т.п.

В случае упрочнения композита волокнами конечной длины нагрузка на них передается посредством матрицы с помощью касательных напряжений. При условии прочного соединения матрицы с волокном, нагрузка на волокна при растяжении определяется формулой

$$P_B = \tau \pi d l,$$

где  $\tau$  — касательное напряжение, возникающее в матрице в области контакта с волокном;

$l$  — длина волокна;

$d$  — диаметр волокна.

Увеличение длины волокна способствует возникновению в нем напряжений. При достижении волокном критической длины  $l_{кр}$ , напряжение достигает максимальных значений и сохраняется даже при дальнейшем увеличении длины волокна.

Критическая длина  $l_{кр}$  рассчитывается из равенства усилий в матрице на границе с волокном и в самом волокне с учетом симметричного распределения напряжений в нем:

$$\tau \pi d l_{кр} / 2 = \sigma_B \pi d^2 / 4;$$

$$l_{кр} = \sigma_B d / (2\tau) \text{ или } l_{кр} / d = \sigma_B / (2\tau).$$

Теоретически и практически установлено, что степень упрочнения ( $\sigma_B^{KM} / \sigma_B^B$ ) композиционного материала тем выше, чем больше отношение длины волокна к его диаметру (тоньше и длиннее волокно) (рис. 3.1).

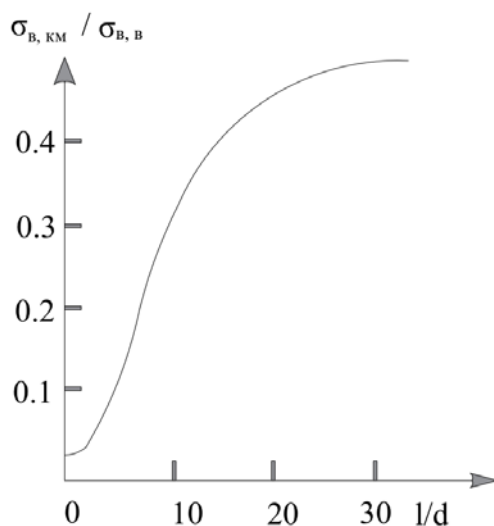


Рис. 3.1. График теоретической зависимости эффективности упрочнения композиционного материала от значения соотношения  $l/d$  упрочнителя

При увеличении модуля упругости  $E$  и поверхностной энергии вещества  $\gamma$  теоретическая прочность материалов  $\sigma_M$  возрастает, а при увеличении расстояния  $a_0$  между соседними атомными плоскостями — снижается:

$$\sigma_M = \left( \frac{\gamma E}{a_0} \right)^{1/2}.$$



Высокопрочные твердые тела, имеющие высокий модуль упругости и поверхностной энергии, характеризуются большим числом атомов в единице объема. Материалы с наибольшей прочностью всегда не только содержат один из таких химических элементов, как азот, кремний, алюминий, бериллий, бор, кислород и углерод, но могут состоять только из них.

При растяжении материала вдоль волокон основную нагрузку воспринимают высокопрочные волокна, а матрица выступает средой для передачи усилий. Исходя из принципа аддитивности можно рассчитать упругие свойства волокнистых композитов при условии неразрывности упругой деформации на границе раздела «волокно — матрица».

Модуль упругости  $E_K$  композиционного материала вдоль волокон вычисляется из выражения

$$E_K = E_B V_B + E_M (1 - V_B),$$

где  $E_K, E_B, E_M$  — модули упругости композита, волокнистого наполнителя и матрицы.

Модуль упругости композита поперек волокон соответственно равен

$$E_K = \frac{E_M E_B}{E_M V_B + E_B (1 - V_B)}.$$

При растяжении композита вдоль волокон коэффициент Пуассона определяется свойствами исходных компонентов из уравнения:

$$\nu_K = \nu_B V_B + \nu_M (1 - V_B).$$

Прочность волокнистых композитов определяется исходя из закона аддитивности:

$$\sigma_K = \sigma_B V_B + \sigma_M (1 - V_B),$$

где  $\sigma_K$  и  $\sigma_B$  — пределы прочности композита и волокнистого наполнителя соответственно;  $\sigma_M$  — напряжение при разрыве волокна в матрице.

Согласно закону Гука в случае упругой деформации волокна  $\varepsilon_B$  и матрицы  $\varepsilon_M$  без проявления пластичности вплоть до разрушения справедливо следующее выражение:

$$\varepsilon_B = \frac{\sigma_B}{E_B} = \frac{\sigma_M}{E_M}.$$

Соответственно,

$$\sigma_M = \frac{\sigma_B E_M}{E_B}.$$

При достаточно высокой пластичности матрицы ее предел прочности  $\sigma_M$  соответствует ее пределу текучести.

Прилагаемая внешняя нагрузка распределяется на матрицу и волокнистый наполнитель пропорционально их объемному содержанию, увеличение их содержания приводит к повышению прочности композита.

Условие совместной деформации волокна и матрицы  $\varepsilon_K = \varepsilon_M = \varepsilon_B$  в момент приложения нагрузки обеспечивается прочностью адгезионного взаимодействия на границе раздела между ними.

### 3.3. Материалы матрицы

Для качественного соединения волокон с матрицей необходимо прежде всего обеспечить хороший контакт по всей поверхности взаимодействующих компонентов. Композиты относятся в основном к термодинамически неравновесным системам. Это является главной причиной диффузионных процессов и химических реакций, происходящих на границе раздела между волокном и матрицей не только при изготовлении композитов, но и при их использовании. Взаимодействие между компонентами необходимо как для обеспечения прочной связи между ними, так и для передачи напряжений.

Высокая прочность сцепления волокнистого наполнителя с матрицей будет способствовать обеспечению заданных прочностных и эксплуатационных характеристик композитов. При этом между матрицей и наполнителем могут возникать различные типы связи, которые представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Типы связей, возникающих в композитах

Тип связи	Описание взаимодействия
Механическая связь	Возникает благодаря зацеплению неровностей поверхностей матрицы и наполнителя, а также действию трения между ними. Композиты с таким типом связи обладают низкой прочностью при продольном сжатии и поперечном растяжении
Связь, возникающая за счет сил поверхностного натяжения	Появляется за счет действия сил поверхностного натяжения при пропитке волокон жидкой матрицей вследствие смачивания и небольшого растворения компонентов
Реакционная связь	Вызвана химическим взаимодействием компонентов на границе раздела, в результате чего образуются новые химические соединения
Обменно-реакционная связь	Возникает при протекании двух и более стадийных химических реакций.
Оксидная связь	Появляется на границе раздела металлической матрицы и оксидного наполнителя ( $Ni - Al_2O_3$ ) благодаря образованию сложных оксидов типа шпинели и др.
Смешанная связь	Обнаруживается при разрушении оксидных пленок и возникновении химического и диффузионного взаимодействий компонентов.

В волокнистых композиционных материалах важная роль отводится матрице, которая выполняет следующие функции:

- обеспечивает целостность композиционного материала;
- фиксирует форму изделия и взаимное расположение армирующих волокон;
- обеспечивая равномерную нагрузку вдоль волокон и её перераспределение при разрушении части волокон, перераспределяет действующие напряжения по всему объему материала.

От материала матрицы зависит метод производства изделий, габариты, методы обработки и т.д. Таким образом, при выборе материала матрицы важную роль играют эксплуатационные (физико-химические и механические свойства) и технологические (размещение волокон в матрице без касания между ними, высокая адгезия) факторы.

### 3.4. Фибробетоны

Одним из наиболее перспективных конструкционных материалов для многоцелевого применения в строительстве является **дисперсно-армированный бетон**, или **фибробетон**. Прочность обычных бетонов при растяжении значительно уступает прочности при сжатии. Многообещающим направлением в технологии бетона является использование волокнистых наполнителей в качестве армирующих компонентов для получения бетонов нового типа с повышенными эксплуатационными и прочностными показателями.

Исходными армирующими элементами таких бетонов могут выступать металлические, минеральные и органические волокна в виде непрерывных нитей или дискретных (коротких отрезков) волокон — **фибры**, которые равномерно распределяются по всему объему цементной матрицы. Такой вид армирования носит название дисперсного. На рис. 3.2 приведена классификация дисперсно-армированных бетонов.

Введение волокон (или фибры) в состав бетона с произвольной или направленной ориентацией способствует повышению прочности цементных бетонов при сжатии и растяжении, увеличению трещиностойкости, ударной вязкости и износостойкости.

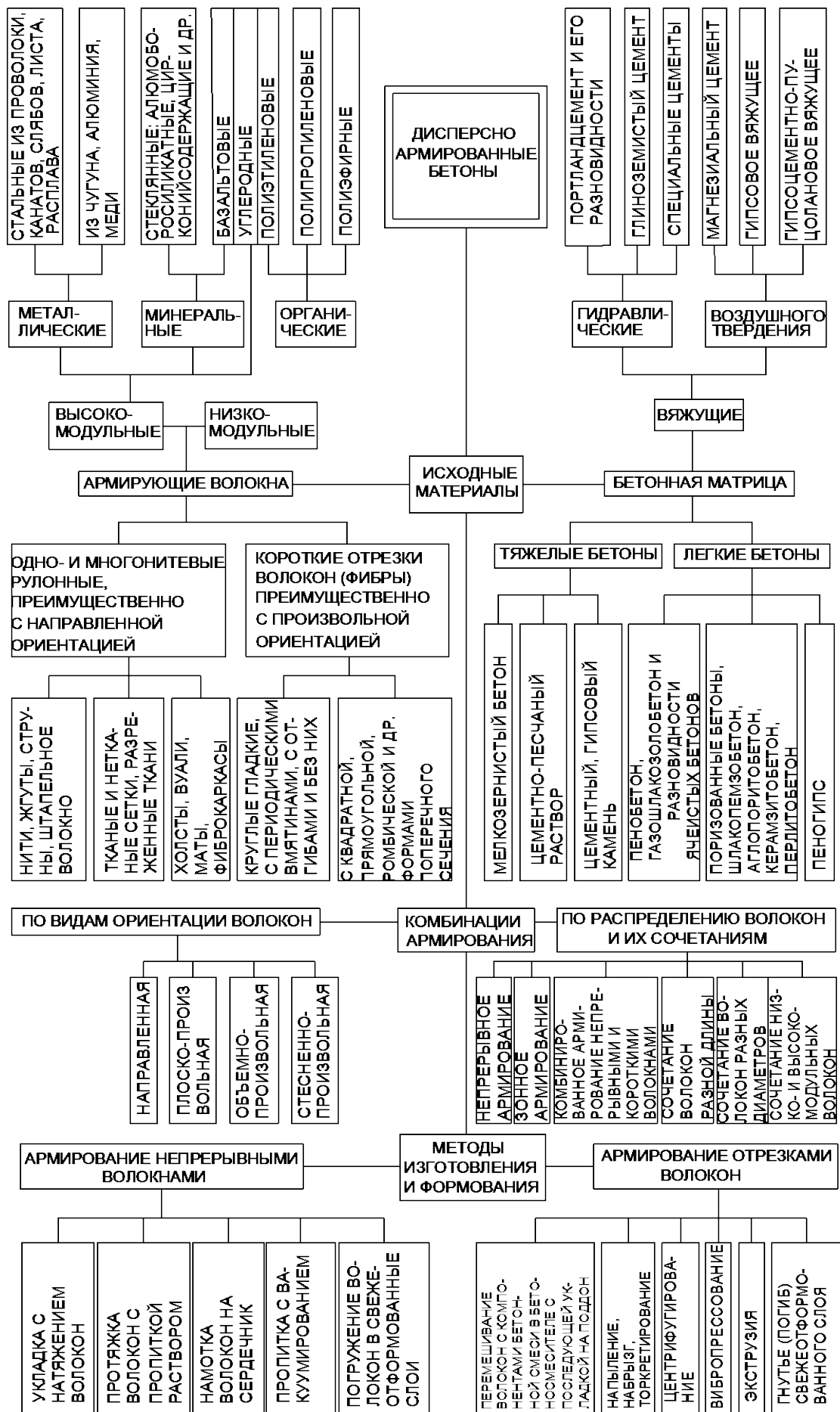


Рис. 3.2. Классификация дисперсно-армированных бетонов

При дисперсном армировании можно получать направленную и произвольную (свободную) ориентацию. В случае *направленной ориентации* армирование по всему объему бетона осуществляется непрерывными волокнами, нитями, ткаными и неткаными сетками и другими материалами. Формование изделий в магнитном поле короткими стальными фибрами также способствует получению дисперсно-армированного бетона с направленной ориентацией.

В свою очередь *произвольная ориентация* подразделяется на плоско-произвольную, объемно-произвольную и стесненно-произвольную.

В случае дисперсного армирования при произвольном ориентировании применяются короткие волокна или рулонные материалы с хаотичным переплетением нитей.

Дисперсное армирование листовых и плитных тонкостенных изделий малой толщины и большой длины осуществляется посредством *плоско-произвольного ориентирования* с хаотичным и свободным распределением волокна в двумерном пространстве.

Свободное и хаотичное распределение коротких армирующих волокон в трехмерном пространстве по всему объему бетона с углом наклона волокна по отношению к поверхности изделий в пределах от 0 до 90° носит название *объемно-произвольной ориентации*. При этом во всех направлениях размеры изделия значительно превосходят длину волокна.

При дисперсном армировании таких конструкций, как балки, ребра плит и перемычек, имеющих ограниченную высоту и ширину, наблюдается *стесненно-произвольная ориентация*, при которой расположение волокна имеет ограниченную свободу в объеме бетона.

С уменьшением размеров поперечного сечения изделий вероятность свободной ориентации армирующих волокон снижается, особенно в тех случаях, когда размеры изделия превышают длину волокна не более чем в 5 раз. И, наоборот, с увеличением размеров поперечного сечения ориентация волокна в бетоне становится приближена к плоско- или объемно-произвольному расположению с сокращением эффекта стеснения.

В случае дисперсного армирования бетонов возможно применение не только фибр одного вида, но и смеси разных видов, составов и длин.

Применение армирующих волокон в цементных бетонах способствует повышению прочностных показателей цементного камня при растяжении и изгибе в 1,5–3,5 раза.

### 3.5. Разновидности армирующих волокон

К основным требованиям, предъявляемым к армирующим волокнам в бетонах, относятся прочность, деформативность, химическая стойкость материала волокон, адгезия к материалу матрицы и коэффициент линейного расширения. Решающую роль в выборе армирующего компонента будет играть вопрос его себестоимости и объем производства.

Существует волокнистые материалы на металлической и неметаллической основе.

В качестве **металлической фибры** в фибробетонах широкое распространение получила стальная проволока диаметром 0,1–0,5 мм и длиной 10–50 мм, полученная либо специальным штампованием, либо нарезкой на отрезки определенной длины. Лучшими прочностными показателями обладают бетоны с фиброй диаметром 0,3 мм и длиной 25 мм. Увеличение диаметра металлической фибры свыше 0,6 мм способствует снижению прочности и эффективности ее применения при дисперсном армировании.

**Неметаллические волокна** могут быть представлены стеклянными, базальтовыми, асбестовыми и другими волокнами. Обычно они имеют диаметр порядка нескольких десятков микрометров и длину 20–40 мм. Стеклянные волокна, имея высокую прочность на растяжение в пределах 1500–3000 МПа, разрушаются под действием щелочной среды цементной матрицы. Поэтому при использовании данного вида волокна необходимо проводить специальные мероприятия, предохраняющие их от разрушения.

**Полимерные волокна** получили широкое применение в дисперсном армировании ячеистых бетонов, гипсобетонов и других материалов с низким модулем упругости. Такие волокна не подвергаются коррозии под воздействием щелочной среды гидратирующегося портландцемента. Обладая меньшим модулем упругости, чем у цементного камня, они имеют температурный коэффициент линейного расширения, превосходящий цементный камень в 3–9 раз.

Основным недостатком полимерных органических волокон, к которым относится нейлоновая, полиэтиленовая, полиэфирная, полиакрилатная и полипропиленовая фибра, является невысокая прочность сцепления с цементной матрицей, что требует наносить на волокна покрытие.

*Нейлоновое волокно*, разработанное в 1938 г. американской компанией DuPont, является первым синтетическим волокном, рекомендованным для армирования бетонных конструкций при действии динамических нагрузок. Однако эти волокна состоят из элементарных нитей и имеют ряд недостатков: отличаются низкой технологичностью, имеют повышенную стоимость по сравнению с полипропиленовыми волокнами, что служит причиной их недостаточно широкого применения. Прочностные и эксплуатационные свойства сходны со свойствами полипропиленовых волокон.

*Полипропиленовые волокна* впервые были получены в 1963 г., а для дисперсного армирования бетонов впервые применены в 1983 г. (Великобритания). Ранее полипропиленовые волокна производили из пленки путем ее продольной нарезки, дальнейшего вытягивания и скручивания, при этом диаметр получаемых волокон составлял 0,02–0,038 мм (рис. 3.3). Применение полипропиленовых волокон имеет существенные преимущества по сравнению с нейлоновыми ввиду меньшей стоимости и повышенного адгезионного взаимодействия между волокном и цементной матрицей.



Рис. 3.3. Внешний вид полипропиленового волокна

Основным существенным недостатком синтетических волокон является низкая смачиваемость, что влечет за собой отсутствие надлежащего сцепления с цементным камнем и вызывается, прежде всего, механической анкеровкой волокна.

Дисперсное армирование бетона синтетическими волокнами не способствует повышению прочности при сжатии, но при ударных воздействиях прочность значительно повышается за счет сил трения, возникающих при выдергивании волокон в процессе разрушения материала.

В последнее время значительный интерес представляет применение ресурсосберегающих технологий при переработке и утилизации отходов промышленного производства. Продуктом переработки автомобильных шин могут служить вязкие, капроновые, полиамидные синтетические материалы, применяемые в качестве шинного корда, отличающиеся невысокой стоимостью по сравнению с полиэтиленовыми, нейлоновыми и полипропиленовыми. Оптимальное содержание таких волокон в бетонной смеси составляет 0,6–1,0 %. В табл. 3.2 приведены основные свойства волокон, применяемых при изготовлении производстве шинного корда.

Волокна, применяемые в производстве автомобильных шин

Волокно	Число элементарных волокон в нити	Удлинение, %	Прочность при растяжении, МПа	Модуль Юнга, МПа
Полиамидное	140	24	720	1900
Вискозное сверхпрочное	800–1000	14	660	5600

Важным фактором, влияющим на технологию приготовления и получение однородных составов дисперсно-армированной бетонной смеси, является отношение длины фибры к ее диаметру  $l/d$ . Этот фактор оказывает значительное влияние не только на технологические свойства, но и также на степень анкерования фибры в бетоне.

При  $l_f \leq 50d_f$  фибровая масса обладает сыпучестью и способностью к получению однородной бетонной смеси в рядовых бетоносмесителях. Изменения состава армированного бетона при перемешивании не возникает. Однако такая длина фибры не обеспечивает как достаточной анкеровки в бетоне, так и полного использования прочностных показателей стали в конструкциях.

При  $l_f = (80 - 120)d_f$  фибровая масса приобретает связность и способность к комкованию. В дальнейшем пучки соединившихся друг с другом фибр постепенно распадаются при встряхивании. Постепенное введение фибры в бетонную смесь в процессе перемешивания позволяет получить однородную консистенцию. В случае применения рядовых бетоносмесителей количество вводимой фибры ограничивается соотношением  $\mu_f = 2,5d_f/l_f$ , где  $\mu_f$  — объемный коэффициент армирования (или объемное содержание арматуры).

При  $l \geq 200d$  фибровая масса приобретает высокую связность, что приводит к получению такой консистенции бетонной смеси, перемешивание которой в обычных бетоносмесителях невозможно и требуются специальные технологические приемы, основывающиеся на методах роторного набрызга. Многочисленные опыты показали, что наиболее оптимальным является соотношение  $l/d = 100$ .

### 3.6. Сталефибробетоны

**Состав, структура и физико-механические свойства сталефибробетона.** Первые работы по армированию цементных бетонов стальными отрезками относятся к началу прошлого столетия. В 1907 г. В.П. Некрасов провел комплекс работ и описал результаты своих экспериментов с применением проволок малых диаметров в цементных бетонах.

В зависимости от армирования выделяют конструкции:

- с фибровым армированием — при их армировании только фибрами из волокон, равномерно распределенных по объему бетона всего элемента или его части;
- комбинированным армированием — при их армировании фибрами из волокон, равномерно распределенных по объему (сечению) элемента, в сочетании со стержневой, проволочной стальной арматурой.

Для получения высокопрочных дисперсно-армированных композиций необходимо выполнить ряд условий:

- достаточный объем, занимаемый высокопрочными проволоками, из которых изготовлены фибры, и их равномерное распределение по всему объему цементной матрицы с отсутствием общих контактов между ними;
- сохранение волокнами значительной части своей прочности в процессе приготовления бетонной смеси;
- значительное сцепление металлической фибры с цементной матрицей;
- отсутствие химического взаимодействия матрицы с металлическим волокном, т.е. матрица должна быть инертной по отношению к волокнам;
- модуль упругости металлических волокон должен быть большим по сравнению с модулем упругости матрицы;

- высокая прочность цементной матрицы при испытании на сдвиг;
- придание определенной ориентации волокнам для их равномерного распределения в матрице.

Разновидностью дисперсно-армированного бетона является **сталефибробетон (СФБ)**, представляющий собой мелкозернистый или тяжелый бетон — бетон-матрицу со стальными фибрами (волокнами), равномерно распределенными в объеме бетона и выполняющими роль арматуры. Применяется стальная фибра с приведенным диаметром  $d = 0,3 - 1,2$  мм и имеющая  $l/d = 50 - 125$ .

На рис. 3.4 и в табл. 3.3 представлены разновидности металлической фибры и ее основные свойства.

Таблица 3.3

Основные свойства металлической фибры

Вид применяемого волокна	Модуль Юнга, МПа·10 <sup>3</sup>	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность на растяжение, МПа·10 <sup>3</sup>	Удлинение при разрыве, %
Стальная фибра	200	7,8	0,8–3,15	3–4

В бетонах, армированных стальными фибрами, матрица выполняет следующие функции: придает необходимую форму изделию, выполняет защитные функции; воспринимает совместно с металлической фиброй различные воздействия (силовые, температурные и т.д.) и перераспределяет их по всему сечению конструкции. Особое внимание заслуживает идея комбинированного армирования стальными фибрами в сочетании со стержневой обычной или предварительно напряженной арматурой.

Основной технологической сложностью является приготовление сталефибробетонной смеси, в которой стальная фибра должна быть равномерно распределена по всему объему бетона. Для этого существуют специальные технологические приемы приготовления таких смесей. Существует две основные технологии изготовления товарных смесей и изделий из сталефибробетона: применение пневмонабрызга в построечных условиях (торкретирование) и изготовление изделий по технологии предварительного перемешивания смеси с последующим уплотнением приемами вибрирования, роликового формования и центрифугирования в заводских условиях, что требует наличие специального технологического оборудования.



Рис. 3.4. Внешний вид стальной фибры:  
 а — стальная фибра проволочная; б — стальная фибра из шлаков;  
 в — стальная фибра листовая; г — стальная пакетированная фибра Драмикс



Организация производства сталефибробетонных покрытий (монолитные конструкции обделок тоннелей) с применением торкретирования из сталефибробетонных смесей осуществляется непосредственно на строительной площадке заключается в приготовлении сталефибробетонной смеси в бетоносмесителях принудительного, гравитационного действия и автобетоносмесителях и последующем ее нанесении на бетонируемую поверхность при помощи оборудования, включающего компрессор, трубопровод, насос, сопло для подачи сталефибробетонной смеси.

Применение конструкций из сталефибробетона способствует повышению эффективности за счет снижения трудозатрат на укладку и напряжение арматуры, сокращения расхода бетона и стали за счет уменьшения толщины изделий, совмещение операций приготовления смеси и армирования, увеличения долговечности и срока службы конструкций и, как следствие, снижения затрат на текущий ремонт конструкций. Возможно применение комбинированного армирования стальными фибрами совместно с проволочной или предварительно напряженной стержневой арматурой.

**Основные технологические свойства сталефибробетона.** Решающими факторами, от которых в дальнейшем будут зависеть технологические свойства сталефибробетона, являются:

- вид стальной фибры, ее геометрия и характер поверхности;
- геометрические параметры распределения стальной фибры в объеме бетонной смеси (дисперсность армирования);
- объемное содержание стальной фибры в бетонной матрице;
- класс бетонной матрицы и ее однородность;
- характер фибрового армирования и размеры сечения элемента.

В табл. 3.4 приведены сравнительных показатели дисперсно-армированных бетонов по сравнению с обычными. Введение фибры в цементные растворы и бетоны повышает их прочность при сжатии на 90 % и 15 % соответственно. Применение дисперсного армирования упрощает технологию изготовления изделий с возможностью полностью исключить армирование специальными сетками и каркасами, увеличивает ударную вязкость, сопротивление термическому воздействию, а истираемость бетонов снижается примерно в 3–4 раза.

Таблица 3.4

**Улучшение технологических свойств бетона с содержанием 2 % свободно-ориентированного стального волокна по сравнению с обычными бетонами**

Свойства	Улучшение свойств по сравнению с обычными бетонами, %
Прочность на растяжение при изгибе	200
Прочность при изгибе в момент появления первой трещины	150
Прочность на срез	175
Прочность при сжатии	125
Морозостойкость	200
Сопротивление истиранию	200
Долговечность при испытаниях на морозостойкость	200
Предел усталости при изгибе	225
Ударная стойкость	325
Сопротивление выкрашиванию при термическом воздействии	300

На рис. 3.5 и 3.6 представлены графики зависимости прочности при растяжении (при раскалывании) и сжатии мелкозернистого сталефибробетона состава 1 : 2; В/Ц = 0,38 от различного объемного содержания ( $\mu_f = 1,5; 2; 2,5; 3$ ) применяемой стальной фибры периодического профиля, ее длины и диаметра, равного 0,3 мм; 0,55 мм и 0,8 мм; отношения длины стальной фибры к диаметру  $l_f/d_f = 48 - 87$  при статическом и динамическом нагружении. Твердение образцов производилось при 18–20 °С и относительной влажности 75 % в течение



28 сут. Установлено, что с увеличением объемного содержания стальной фибры прочность сталефибробетона на растяжение и при сжатии повышается. Прочность на растяжение при раскалывании повышается с увеличением соотношения  $l_f/d_f$ . Соотношение  $l_f/d_f$  не оказывает существенного влияния на прочность при сжатии и зависит только от величины  $\mu_f$ .

Повышение трещиностойкости сталефибробетона зависит от объемного содержания арматуры, уровня дисперсности армирования бетона (диаметр фибровой арматуры) и однородности бетонной матрицы.

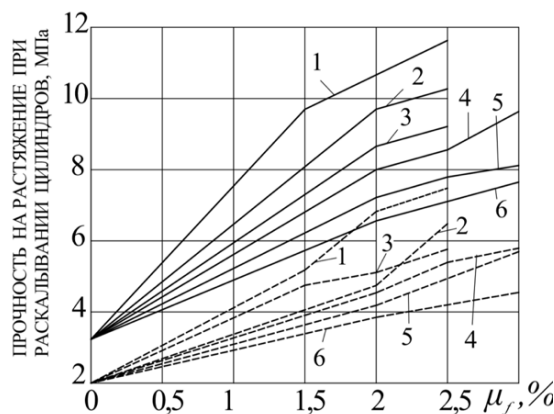


Рис. 3.5. Зависимость прочности при растяжении при раскалывании мелкозернистого сталефибробетона состава 1 : 2; В/Ц = 0,38 от объемного содержания ( $\mu_f = 1,5; 2; 2,5; 3 \%$ ) применяемой стальной фибры (арматуры) периодического профиля, ее длины и диаметра:

1 —  $d_f = 0,8$  мм;  $l_f = 70$  мм; 2 —  $d_f = 0,55$  мм;  $l_f = 50$  мм; 3 —  $d_f = 0,3$  мм;  $l_f = 24$  мм; 4 —  $d_f = 0,55$  мм;  $l_f = 24$  мм; 5 —  $d_f = 0,8$  мм;  $l_f = 35$  мм; 6 —  $d_f = 0,3$  мм;  $l_f = 15$  мм; сплошная линия — статическое нагружение; пунктирная — динамическое нагружение

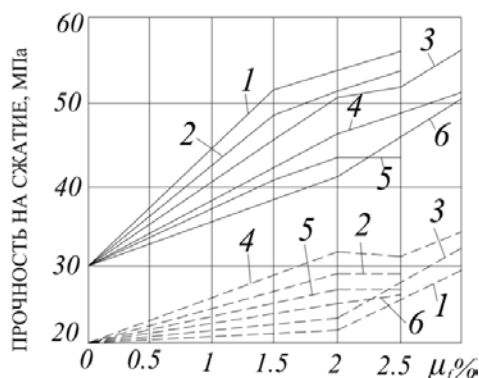


Рис. 3.6. Зависимость прочности при сжатии мелкозернистого сталефибробетона состава 1 : 2; В/Ц = 0,38 от объемного содержания ( $\mu_f = 1,5; 2; 2,5; 3 \%$ ) применяемой стальной фибры (арматуры) периодического профиля, ее длины и диаметра:

1 —  $d_f = 0,55$  мм;  $l_f = 50$  мм; 2 —  $d_f = 0,3$  мм;  $l_f = 24$  мм; 3 —  $d_f = 0,55$  мм;  $l_f = 24$  мм; 4 —  $d_f = 0,3$  мм;  $l_f = 15$  мм; 5 —  $d_f = 0,8$  мм;  $l_f = 70$  мм; 6 —  $d_f = 0,8$  мм;  $l_f = 35$  мм; сплошная линия — статическое нагружение; пунктирная — динамическое нагружение

Армирование металлической фиброй позволяет существенно снизить расход стали, используемой в поперечной, монтажной и распределительной рабочей арматуре, с одновременным снижением коэффициента использования арматуры  $\varphi_s$ , находящимся в пределах 1,3–4,5 и равным:

$$\varphi_s = \frac{m_{\text{ОБЩ}}}{m_{\text{РАБ}}},$$

где  $m_{\text{ОБЩ}}$  — масса всей арматуры, идущей на изготовление железобетонного изделия;

$m_{\text{РАБ}}$  — массе основной рабочей арматуры железобетонного изделия.

Применение комбинированного армирования способствует заметному повышению сцепления с бетоном рабочей стержневой арматуры, а в некоторых случаях позволяет полностью отказаться от поперечной, монтажной и распределительной арматуры в конструкциях, снизив, тем самым, расходы на арматурные работы и повысив эффективность рабочей арматуры.

Установлено, что для конструкций, предельное состояние которых ограничивается их несущей способностью, рекомендуется использование фибры большого диаметра ( $d = 1 - 1,4$  мм), а для конструкций, к которым предъявляются требования повышенной трещиностойкости, — стальной фибры малых диаметров ( $d < 1$  мм).

Характер дисперсного армирования оказывает значительное влияние на деформативные свойства сталефибробетона. Достаточно близкое расположение фибр в материале тормозит развитие локальных трещин в бетоне с одновременным повышением его предельной растяжимости и прочности. Деформативные свойства СФБ при прочих равных условиях изменяются прямо пропорционально степени объемного насыщения и обратно пропорционально приведенному диаметру фибры.

Начальный коэффициент поперечной деформации СФБ превышает аналогичные значения коэффициента обычного бетона на 10–20 %. Начальный модуль упругости СФБ зависит как от соответствующего показателя бетона, так и от коэффициента фибрового армирования.

Исследования СФБ на истираемость свидетельствуют о структурном улучшении этого материала по сравнению с неармированным бетоном. Показатель сопротивления истираемости улучшается в среднем в 2 раза по сравнению с неармированным бетоном, и фибры истираются совместно с бетоном-матрицей.

Высокая коррозионная стойкость и значительное улучшение структуры сталефибробетона объясняется присутствием армирующих волокон, которые способствуют образованию мелкопористой структуры матрицы, что снижает глубину карбонизации (насыщение диоксидом углерода) в 1,5–2 раза по сравнению с неармированным бетоном.

Конструкции из сталефибробетона при одностороннем разогреве обладают повышенной огнестойкостью по сравнению с бетоном-матрицей — на 10–20 %, что объясняется присутствием армирующих волокон, которые обеспечивают теплопередачу от нагретой стороны к холодной, уменьшая температурный градиент и снижая температурные напряжения.

Многочисленными исследованиями установлено эффективность применения сталефибробетонных изделий, отличающихся более высоким уровнем трещиностойкости и ударной прочности по сравнению с изделиями, армированными рабочей арматурой. Применение стальной фибры способствует более равномерному перераспределению энергии ударных воздействий и возникающих в бетоне усилий, препятствует развитию трещин, и возникновению магистральных трещин, что объясняется структурными особенностями и строением сталефибробетона.

**Получение стальной фибры.** Сегодня сталефибробетон активно используется в сборном и монолитном строительстве. Применяются стальные фибры с различной формой поперечного сечения: круглой, овальной, прямоугольной, диаметром  $d = 0,2 - 1,6$  мм и длиной  $l = 10 - 160$  мм. Изготавливаются фибры с гладкой, профилированной и обработанной травлением поверхностью. В последние годы получили широкое распространение фибры, имеющие волнистый профиль или анкерованные, с загибами на концах. Широкое распространение получила стальная проволочная фибра с диаметром  $d = 0,3-1,6$  мм и  $l = 80 - 100$  мм.

Для изготовления стальной фибровой арматуры применяется стальная низкоуглеродистая проволока общего назначения, соответствующая ГОСТ 3282–74 «Проволока стальная низкоуглеродистая общего назначения. Технические условия». Существуют способы повышения анкеровки фибры в бетоне, включающие профилирование сечения в процессе резки, придание ей волнистого профиля, травление поверхности, деформирование, устройство крючков на концах фибр. Производство фибры из отходов листовой стали организуется на нескольких металлургических предприятиях.

Существует пять основных способов получения стальной фибровой арматуры.

1. Изготовление из проволоки с последующей резкой и профилированием ее сечения.
2. Использование отработанных стальных канатов с дальнейшей их резкой на отрезки необходимой длины, их последующим разделением и удалением смазки.

3. Изготовление из стальных листов необходимой ширины и дальнейшим продольным или поперечным фрезерованием (нарезкой).
4. Изготовление из стальных заготовок (слябов) в виде слитков с последующей нарезкой.
5. Получение стального волокна путем вытяжки их из расплава.

Наибольшее распространение получили способы изготовления фибры из проволоки, стальных отработанных канатов и тонкого стального листа.

Распространяется также способ изготовления инновационной стальной анкерной фибры Dramix®, бельгийского концерна Bekaert, представляющей собой клеенную фибру из проволоки холодного волочения с загнутыми концами, полученную из деформированного и нарезанного проволочного волокна и обозначаемую как 3D, 4D, 5D. Геометрические размеры такой фибры представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Геометрические размеры стальной анкерной фибры Dramix®

Промышленное название	Длина, мм	Диаметр, мм	$l/d$
DRAMIX 3D 45/35BL	33	0,75	45
DRAMIX 3D 40/30BG	30	0,75	40
DRAMIX 3D 45/30BG	30	0,62	45
DRAMIX 4D 65/35BG	35	0,55	65
DRAMIX 4D 55/60BG	60	1,05	55
DRAMIX 4D 65/50BG	50	0,75	65
DRAMIX 4D 65/60BG	60	0,9	65
DRAMIX 5D 65/60BG	60	0,9	65
DRAMIX 5D 65/60GG	60	0,9	65

Получение фибры по такой технологии заключается в предварительной обработке водорастворимым клеем стальной проволоки, подаваемой из бухт, последующим высушиванием в печи, нарезкой на блоки с одновременной анкеровкой концов фибры. На рис. 3.7 представлено схематическое изображение установки для изготовления пакетов стальной анкерной фибры Dramix®. Применение таких пакетов фибры снижает транспортные расходы, повышает качество технологического процесса смешивания фибры с компонентами бетонной смеси.

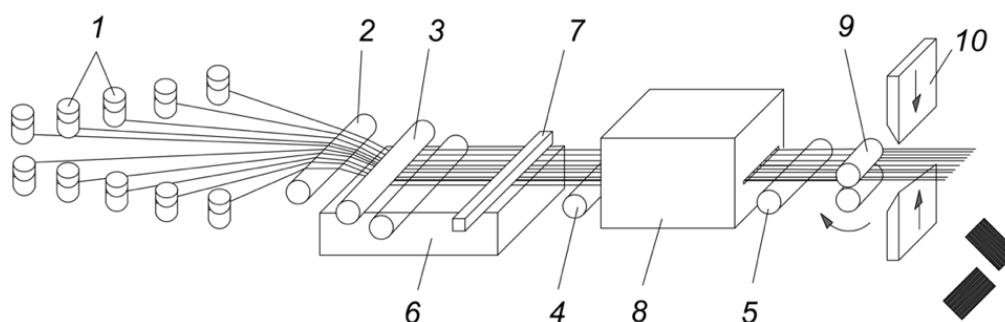


Рис. 3.7. Технологическая схема установки получения клееной стальной анкерной фибры Dramix®:

- 1 — бухты стальной проволоки; 2—5 — направляющие ролики; 6 — бункер клеевого состава;
- 7 — устройство для удаления излишков клеевого состава; 8 — печь для сушки проволоки;
- 9 — прижимные ролики; 10 — устройство для обрезки и анкеровки концов фибры

**Технология производства изделий из сталефибробетона.** Изготовление сталефибробетона содержит три основных технологических передела, включающих получение фибровой арматуры; приготовление фибробетонной смеси; формование изделий.

Для получения сталефибробетона рекомендуется использовать мелкозернистый бетон с кварцевым песком крупностью зерен не более 5 мм, со средней плотностью более 2200 кг/м<sup>3</sup> или тяжелый малощебеночный бетон с максимальной крупностью зерен заполнителя ( $D_{\max} = 10$  мм), содержанием доли песка в смеси заполнителей  $r = 0,45 - 0,55$  и водопоглощением до 8 %.

Максимальный размер фракций заполнителя для сталефибробетона не должен быть более 0,25 длины применяемой фибры и величины  $S$ , равной:

$$S = \frac{d_{\text{red}}}{\sqrt{\mu_f k_{\text{ор}}}},$$

где  $d_{\text{red}}$  — диаметр металлической фибры круглого сечения, мм;

$\mu_f$  — коэффициент армирования;

$k_{\text{ор}}$  — коэффициент ориентации фибры и находящийся в пределах 0,5–0,98.

В случае применения фибры другого сечения  $d_{\text{red}}$  рассчитывается по формуле

$$d_{\text{red}} = \sqrt{\frac{4A_f}{\pi}},$$

где  $A_f$  — площадь поперечного сечения фибры, мм<sup>2</sup>.

Для защиты фибр от коррозии бетон должен иметь высокую водонепроницаемость и морозостойкость, а минеральные вяжущие не должны быть агрессивными по отношению к армирующим волокнам. В качестве минеральных вяжущих рекомендуется применять бездобавочный портландцемент, портландцемент с минеральными добавками, напрягающие цементы, глиноземистые (в случае применения фибры из нержавеющей стали или фибры с защитным покрытием). Не следует применять быстротвердеющий и пуццолановый портландцементы. Рекомендуется применять химические добавки для достижения заданной подвижности и улучшения удобообрабатываемости смесей.

Приготовление фибробетонных смесей представляет определенные технологические трудности, связанные с равномерностью и дисперсностью их распределения в заданных пропорциях в растворных и бетонных смесях. В случае использования традиционного способа перемешивания при введении металлической фибры в растворную или бетонную смесь возможно образование скоплений волокон в виде комков и клубков.

Для обеспечения равномерного распределения волокна в растворе или бетоне необходимо учитывать несколько факторов, а именно: отношение  $l_f/d_f$ , объемное содержание фибры  $\mu_f$ , размер частиц заполнителя и его количество, способ перемешивания смеси.

Увеличение длины армирующих волокон способствует увеличению анкерующей способности бетонной матрицы, но может служить причиной недостаточной однородности смеси и снижения равномерного распределения фибры по всему объему при перемешивании.

Считается, что наиболее рациональным отношением длины к диаметру стальной фибры при существующих технологиях перемешивания смесей может быть величина  $l_f/d_f = 100$  при  $\mu_f = 2 - 3 \%$ . Установлено, что при прочих равных условиях образцы из сталефибробетона имеют одинаковую прочность при равных значениях выражения  $\mu_f(l_f/d_f)$ . Следовательно, обеспечение одинакового эффекта по прочности может быть достигнуто либо уменьшением длины фибр и увеличением их содержания в бетонной матрице, либо увеличением длины фибр и уменьшением их содержания в бетоне.

Технология приготовления сталефибробетонных смесей оказывает решающее значение на получение конечного сталефибробетона высокого качества. Особую роль играет степень равномерного распределения металлической фибры во всем объеме бетона, которая зависит от размера применяемой фибры, соотношения  $l_f/d_f$  и объемного содержания фибры  $\mu_f$ , удобоукладываемости бетонной смеси, способа введения фибры в бетоносмеситель и типа бетоносмесителя.

Существуют следующие способы получения сталефибробетонных смесей.

Первый способ включает первичное совместное перемешивание всухую песка, крупного заполнителя, дальнейшее последующее введение в сухую смесь необходимого количество стальной фибры, предварительно просеянной через сито. Далее в эту смесь вводятся цемент и вода с добавками, производится перемешивание до достижения однородной консистенции бетонной смеси.

Второй способ включает введение стального волокна в смесь заполнителей с частью воды затворения и последующем дальнейшем введении вяжущего и оставшейся части воды. В случае изготовления мелкозернистой бетонной смеси волокна необходимо вводить в последнюю очередь.

Третий способ является одним из оптимальных способов приготовления сталефибробетонной смеси, при котором подача металлической фибры в бетоносмеситель осуществляется с помощью специального вращающегося барабана, установленного над ним. Стальная фибра под действием центробежных сил из барабана равномерно подается в работающий бетоносмеситель.

Четвертый способ заключается в одновременном изготовлении стальной фибры и приготовлении фибробетонной смеси в бетоносмесительной установке. При этом над бетоносмесителем устанавливается специальное устройство для изготовления фибры из стальной проволоки, в котором производится нарезка проволоки на отдельные фибры с одновременной их подачей и перемешиванием в бетоносмесителе.

В общем приготовление сталефибробетонной смеси может осуществляться в смесителях принудительного действия, вихревых, струйных, турбулентных и др. Гравитационные смесители применяются при небольшом содержании фибры малой длины.

Для предотвращения образования скоплений волокон в виде комков и клубков используют специальные технологические приемы, заключающиеся в следующем:

- введение пластификаторов для снижения жесткости и увеличения подвижности фибробетонной смеси;
- в случае применения листовой фибры — соблюдение необходимого соотношения между ее шириной и толщиной, равное не более 5;
- применение склееной фибры в виде пакетов или блоков;
- снижение отношения  $l_f/d_f$  в сторону допустимых значений;
- подача стальной фибры в смеситель специальными устройствами;
- постепенное равномерное сокращение продолжительности приготовления.

Увеличение содержания волокнистого наполнителя способствует снижению удобоукладываемости бетонной смеси, причем при прочих равных условиях более заметное влияние оказывает увеличение длины волокна или уменьшение его диаметра.

Стальными или неметаллическими волокнами армируют, как правило, мелкозернистые бетоны или цементный камень. Обычно стальную фибру вводят в бетонную смесь в количестве 1–2,5 % от объема бетона (3–9 % по массе, что составляет 70–200 кг фибры на 1 м<sup>3</sup> смеси).

Расход цемента в сталефибробетоне колеблется в пределах 350–550 кг/м<sup>3</sup>. При этом необходимо соблюдать водоцементное отношение, находящееся в пределах 0,35–0,55. Для снижения расхода цемента допускается использование активных минеральных добавок искусственного происхождения (зола-унос), применять пластифицирующие высокоэффективные добавки-разжижжители, минеральные тонкодисперсные наполнители или органоминеральные модификаторы при строгом контроле за расслаиваемостью смеси.

Допустимое содержание крупного заполнителя в сталефибробетонных смесях должно находиться в пределах 20–25 % по объему, с максимальной крупностью до 10 мм, а в некоторых случаях и до 20 мм. С увеличением расхода крупного заполнителя в смеси необходимо снизить содержание фибры по объему для предотвращения неравномерного распределения фибры по всему объему и комкования. Рекомендуется при использовании фибры малого диаметра применение мелкозернистых бетонов состава (1 : 2) – (1 : 3).

Централизованное приготовление сталефибробетонной осуществляется, как правило, на бетоносмесительных установках (БСУ) действующих заводов с использованием необходимого оборудования для введения фибры. При этом приготовление конечного продукта в виде сталефибробетонной смеси может идти по двум технологическим схемам:

- совместное смешение волокон с компонентами бетонной смеси непосредственно в бетоносмесителе;
- первичное приготовление бетонной смеси и последующее смешение фибры с приготовленной бетонной смесью в другом смесителе.

Производство фибробетонных изделий возможно осуществлять по всем существующим в настоящее время технологиям: стандовой, конвейерной, агрегатно-поточной и полуконвейерной.

Особое внимание заслуживает способ торкретирования с применением сталефибробетонных со смесей, позволяющий производить работы по восстановлению бетонных и железобетонных конструкций шахт, тоннелей и огнезащитных футеровок, фундаментов работающих машинных установок без дополнительного армирования, ремонту горизонтальных и вертикальных поверхностей, подверженных высоким ударным и динамическим нагрузкам и не отличается от операций по изготовлению изделий из обычных бетонов.

**Области применения сталефибробетона.** Сталефибробетон рекомендован к применению в конструкциях, к которым предъявляются требования повышенной трещиностойкости, истираемости, сопротивляемости ударным и знакопеременным нагрузкам. К ним относятся монолитные и сборные конструкции, аэродромные и дорожные покрытия, мостовые пролетные строения, полы промышленных зданий, подпорные стены, тонкостенные и ребристые плиты покрытий, элементы оболочек и несъемной опалубки, сваи и шпалы.

Сталефибробетон рекомендуется к применению при изготовлении свай, что связано с повышенной ударной вязкостью разрушения сталефибробетона, превосходящую железобетон более чем в 2 раза при одинаковом расходе стали.

Сталефибробетон применяется при изготовлении водопроводных и канализационных труб и колец, в том числе методом радиального прессования с использованием проволоочной и листовой фибры из мелкозернистого бетона класса В15 с объемным содержанием  $\mu_f = 0,5\%$ .

Производство водопроводных и канализационных колец из сталефибробетона с добавлением проволоочной фибры волнистого профиля с  $d = 0,5-0,7$  мм повышает качество выпускаемой продукции и производительность труда, снижает трудозатраты и материалоемкость конструкций.

### 3.7. Бетоны, армированные неметаллическими волокнами

Существуют следующие виды неметаллических волокон:

- высокомодульные стеклянные (минеральные, неорганические) и углеродные волокна, выполняющие роль армирующего компонента и повышающие прочность бетона при растяжении, жесткость, сопротивление динамическим воздействиям;
- низко модульные нейлоновые, полиэтиленовые, полипропиленовые волокна органического происхождения, обладающие высоким относительным удлинением при разрыве и способствующие повышению ударной вязкости бетона. Основные физико-механические характеристики неметаллических волокон представлены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

**Основные физико-механические характеристики неметаллических волокон**

Волокно	Прочность на растяжение, МПа · 10 <sup>3</sup>	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Удлинение при разрыве, %	Модуль Юнга, МПа · 10 <sup>3</sup>
Полипропиленовое	0,4–0,77	0,9	10–25	3,5–8,0
Полиэтиленовое	0,7	0,95	10	1,4–4,2
Нейлоновое	0,77–0,84	1,1	16–20	4,2
Акриловое	0,21–0,42	1,1	25–45	2,1
Полиэфирное	0,73–0,78	1,4	11–13	8,4
Стекловолокно	1,05–3,85	2,6	1,5–3,5	70–80
Углеродное	2,0	2,0	1	245

*Углеродные волокна* имеют уникальные свойства, не разрушаются в щелочной среде цементного камня, повышают его прочность на растяжение и модуль упругости, отличаются повышенной стоимостью по сравнению со стальными и стеклянными волокнами.

*Стеклянные (минеральные) волокна* имеют различный химический состав, разные физико-механические и конструкционные характеристики. К ним относятся плавленный кварц, силикатные, фосфатные, боратные, свинцовые оксидные соединения, соединения на основе мышьяка, сурьмы и серы, селена, теллура (халькогенидные стекла).

Впервые стеклофибробетон появился в 1969 г. и с тех пор получил широкое распространение. Сырьем для получения стеклянных волокон служат стекла: кварцевые, алюмосиликатные, боросиликатные, натрий-кальциевые силикатные, цирконий-силикатные и просто силикатные. Неорганические волокна возможно получить из шлаков и базальта. Неорганическое стекло находится в аморфном состоянии, которое получают переохлаждением расплава и обратимым переходом из жидкого состояния в стеклообразное. Стеклообразное состояние занимает промежуточное положение между кристаллическим и жидким. Основными стеклообразующими оксидами являются оксиды кремния, германия, фосфора и бора. В образовании каркаса стекла могут принимать участие и другие оксиды, например,  $Al_2O_3$ ,  $FeO$ ,  $TiO_2$ ,  $Bi_2O_3$ ,  $SeO_2$ ,  $Al_2O_3$ , называемые условными стеклообразователями. Эти соединения самостоятельно не образуют стекла, но в присутствии некоторых стеклообразующих оксидов все-таки способствуют возникновению стеклообразных фаз.

Стеклянные волокна превосходят по стоимости обычную стальную арматуру, однако их применение может быть оправдано в случае дефицита арматурной стали, а также для армирования тонкостенных конструкций.

Применение стеклянных волокон для армирования цементных композитов в недавнее время ограничивало их применение и представляло определенные сложности, связанные с недостаточной щелочестойкостью стекловолокна. Проведенные исследования в этой области способствовали поиску новых решений, способных устранить указанные недостатки. Так, английская фирма Pilkington Brothers 1970-х годов разработала и начала производство щелочестойкого высокоциркониевого стеклянного волокна Cemfil для композитов на основе цементных вяжущих. Проблема совершенствования и улучшения свойств стекла для армирования цементных композитов остается актуальной и требует поиска новых составов и технологических решений.

Химический состав стекла и способ получения оказывает решающее значение на свойство конечного продукта. По химическому составу промышленные стекла и стекловолокна подразделяются на две основные группы:

- бесщелочные — с содержанием щелочных оксидов не более 1–2 %;
- щелочные — с содержанием щелочных оксидов 10–15 %.

В промышленных масштабах освоено производство непрерывных стеклянных волокон в виде одиночных нитей и штапельных (дискретных) волокон ограниченной длины.

Стекловолокно непрерывной длины производят на специальных установках вытягиванием из расплавленной стекломассы. Применение тугоплавких составов представляет определенные технологические сложности при производстве волокон. Расплавленная масса, находящаяся в специальной емкости с небольшими отверстиями (фильерами) определенного диаметра в днище, под давлением проходит сквозь них и кристаллизуется. Например, температура получения волокна из стекол, содержащих цирконий, находится в диапазоне 1280–1320 °С, при температуре плавления 1180–1200 °С. Полученные элементарные стеклонити объединяются в первичные пучки, которые далее скручиваются и наматываются на бобину. Непрерывное стекловолокно используется для получения ровинга (жгута), тканых или нетканых рулонных материалов. Штапельное стекловолокно диаметром до 20 мкм получают центрифугально-фильерно-дутьевым способом или способом вертикального вытягивания и раздува.

Дисперсно-армированные бетоны изготавливают с применением непрерывных в катушках (ровинга) и дискретных (рубленое стекловолокно) стеклонитей, армированием срезов стекловолокна, стеклохолстов, вуалей, нетканых стеклосеток (рис. 3.8).



Рис. 3.8. Стекловолоконистые материалы, используемые в качестве арматуры

Установлено, что тонкие стеклянные нити имеют высокую прочность, превышающую прочность стекла в массиве в 25–30 раз. Так, прочность при растяжении стеклянных волокон диаметром 10 мкм составляет 1500–2500 МПа, в то время как прочность при растяжении стекла в массиве находится в пределах 50–100 МПа.

Установлено, что при дисперсном армировании бетона, необходимо отдавать предпочтение стеклянным волокнам диаметром до 100 мкм, так как их прочность будет использована в наибольшей степени. В табл. 3.7 представлены значения относительных удлинений и модуля упругости и стеклянных волокон.

Таблица 3.7

**Относительные удлинения и модуль упругости стеклянных волокон разного диаметра**

Диаметр волокон, мкм	Модуль упругости, ГПа	Упругое удлинение, %
10–20	73,5–74,5	2,7–1,5
40–60	76–77	1,3–1,0
80–100	78–79	0,75–0,5

Физико-механические и физико-химические свойства стекловолокон зависят главным образом от химического состава стекла, а также от метода производства. Самую большую прочность имеют непрерывные стекловолокна из бесщелочного и кварцевого магний-алюмосиликатного стекла. Повышенное содержание щелочей в исходном стекле значительно снижает прочность стекловолокон.

По химическому составу и свойствам стеклянные волокна подразделяют на типы: А, Е, С, S, М, D, AR, ECR:

- *стекловолокно типа E* (electrical) — алюмо-кальциево-боросиликатный состав, служит основой для изготовления электрически устойчивого стекловолокна, обладают свойствами низкой электрической проводимости.
- *стекловолокно типа S* (strength) — магний-алюмосиликатный состав, имеют прочность на 40% превосходящую, чем стекло типа E), разработано для аэрокосмоса, имеет высокую прочность.
- *стекловолокно типа C* (chemical) — натрий-боросиликатный состав, обладает высокой химической стойкостью при действии кислот, применяется для изготовления стеклянных штапельных волокон.
- *стекловолокно типа M* (modulus) — обладает высокой упругостью;
- *стекловолокно типа A* (alkali) — состоит из кальциево-натриевого стекла с высоким содержанием щелочей;



- *стекловолокно типа D* (dielectric) — боросиликатный состав с улучшенными диэлектрическими характеристиками и низкой плотностью, обладает низкой диэлектрической проницаемостью;
- *стекловолокно типа AR* (alkali resistant) — стекло с высокой щелочестойкостью, содержит щелочные силикаты циркония, при этом содержание оксида циркония  $ZrO_2$  варьируется в пределах 15–23 %;
- *стекловолокно типа ECR* (extremely corrosion resistance) — модифицированный состав Е-стекла без бора, обладает долгосрочной устойчивостью к коррозии в кислой среде и устойчиво в агрессивных средах.

Пример условного обозначения стекловолокна: щелочестойкое стекловолокно AR2500H200 означает А (alkali resistant) — щелочестойкое; R (roving) — ровинг; 2500 — плотность, г/1000 м<sup>3</sup>; H200 — тип замасливателя.

**Технология получения стеклофибробетона.** Получение высокопрочных дисперсно-армированных бетонов на основе цементного вяжущего и стекловолокна возможно в случае соблюдения следующих требований:

- армирование стекловолокном равной прочности;
- модуль упругости стекловолокна должен быть выше модуля упругости матрицы;
- в процессе перемешивания бетонной смеси, формования изделий или нанесения слоя бетона стекловолокна не должны снижать прочность;
- при получении стеклофибробетонных композитов на основе цементных вяжущих стекловолокно должно способствовать созданию высокой адгезионной прочности между волокном и цементной матрицей;
- равномерное распределение стекловолокнистого наполнителя по всему объему бетона в процессе перемешивания бетонной смеси;
- применение в качестве матрицы химически инертных по отношению к стекловолокну материалов и высокая прочность при сдвиге. Экспериментально установлено, что предел прочности дисперсно-армированного стекловолокном бетона при осевом растяжении, независимо от вида вяжущего и химического состава волокон, возрастает пропорционально увеличению содержания волокна. При содержании волокон в композите менее 1 % его разрушение наступает практически одновременно с разрушением цементного камня, т.е. в момент начала трещинообразования в цементной матрице.

Одной из самых главных проблем применения стекловолокна в цементных композитах является его относительно низкая химическая стойкость по отношению к цементной матрице, проявляющей агрессивность и подвергающей его разрушению под действием  $Ca(OH)_2$ . Влияние продуктов гидратации цемента на свойства стекловолокна можно существенно снизить за счет введения в портландцемент активных минеральных добавок различного происхождения и связывающих свободный  $Ca(OH)_2$  по схеме:

- 1)  $Ca(OH)_2 + SiO_2 + (n - 1)H_2O = CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$  (концентрация CaO меньше концентрации  $SiO_2$ );
- 2)  $2Ca(OH)_2 + SiO_2 + (n - 2)H_2O = 2CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$  (концентрация CaO выше концентрации  $SiO_2$ ).

Для изготовления стеклофибробетонов применяются материалы, соответствующие ГОСТам:

- мелкозернистые бетоны со средней плотностью более 2000 кг/м<sup>3</sup> с водопоглощением менее 8 % по массе в соответствии с ГОСТ 26633–2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия»;
- песок кварцевый с крупностью зерен 1,5–2,5 мм в соответствии с ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия». Мелкий заполнитель для фибробетона принимается с учетом вида фибры, размера изделия и конструктивных особенностей, класса бетона, применяемой технологии бетонирования;
- портландцемент по ГОСТ 31108–2016 «Цементы общестроительные. Технические условия», глиноземистый цемент марок не ниже М400 по ГОСТ 969–91 «Цементы глиноземистые и высокоглиноземистые. Технические условия», микрокремнезем, вяжущее низкой водопотребности (ВНВ).

Повышение содержания стекловолокна в бетоне до 10 % способствует увеличению прочности при растяжении более чем в 2 раза по сравнению с прочностью неармированной цементной матрицы. Положительно влияют добавки некоторого количества асбеста, мраморной пыли, тонкомолотого кирпича или керамики, минеральной ваты и т.д.

Получение стеклоармированных композиций возможно двумя основными способами: пневмонабрызгом и предварительным перемешиванием (премиксингом).

Пневмонабрызг применяется для получения плоских или криволинейных тонкостенных конструкций, а также для создания защитно-конструкционных покрытий. Он заключается в одновременной подаче раствора и волокна на большой скорости под давлением. В соответствии с этим способом рубленая фибра смешивается с предварительно приготовленным раствором в пистолете-распылителе, работающим под давлением. Далее полученная стеклофибробетона смесь подается вместе с сжатым воздухом, наносится на заданную вертикальную или горизонтальную поверхность. Этот способ является наиболее эффективным при производстве стеклофибробетона. Выполнение работ пневмонабрызгом может осуществляться как в заводских условиях, так и непосредственно, на стройплощадке в съемной или несъемной опалубке. По технологии пневмонабрызга рекомендуемая длина волокна находится в пределах 10–50 мм при его максимальном содержании в цементном растворе в случае произвольной ориентации 3–5 % по объему, при направленной ориентации — 10–12 %.

На рис. 3.9 показана технологическая схема для получения стеклофибробетона двумя основными методами: набрызгом и «премиксингом». В технологии набрызга применяется пистолет-распылитель с рубящим устройством в комплекте, растворонасос с регулируемой скоростью подачи стеклобетонной смеси к пистолету-распылителю, растворосмеситель для приготовления мелкозернистой смеси, компрессор с системой воздухоподготовки. В технологии предварительного смешивания используется циклический передвижной растворосмеситель принудительного действия, устройство для рубки и дозирования фибры.

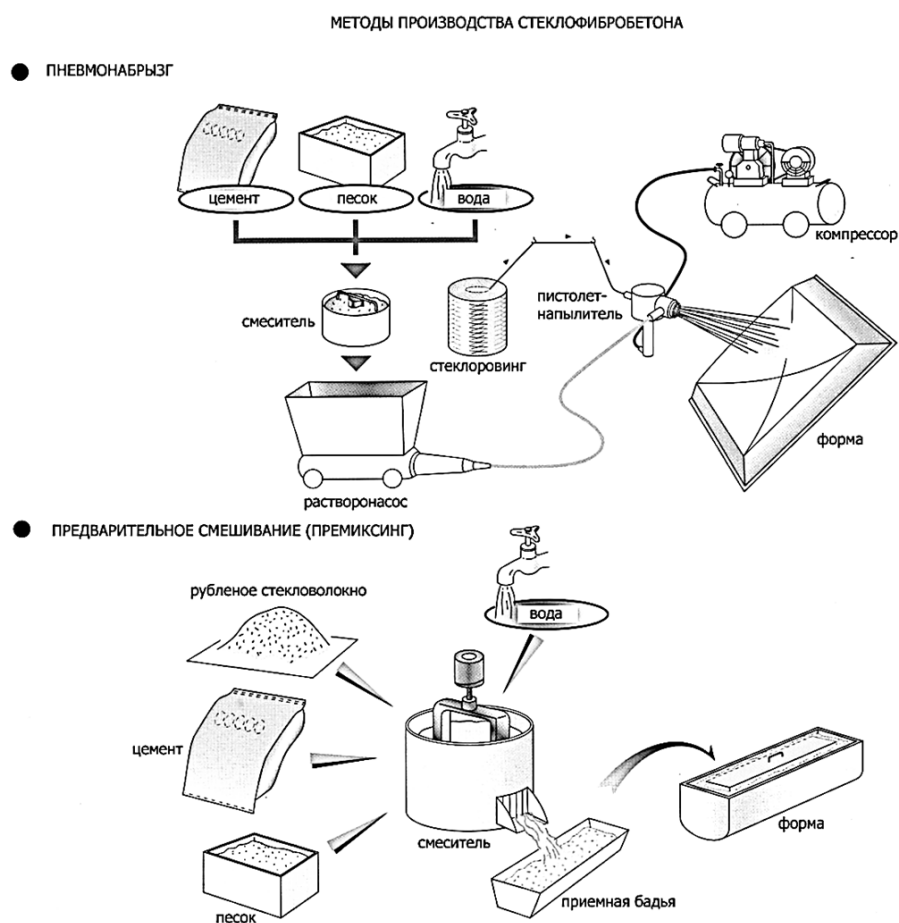


Рис. 3.9. Технологические схемы производства изделий из стеклофибробетона набрызгом и премиксингом

При армировании стеклофибробетона дискретными щелочестойкими фибрами проявляется зависимость его свойств от типа и длины волокна и произвольной или направленной ориентации в объеме бетона, технологии производства и др.

Обладая исключительными свойствами по прочности при сжатии и ударных воздействиях, повышенными показателями прочности при изгибе и растяжении, превышающими характеристики обычного неармированного бетона в 10–15 и 4–5 раз соответственно, стеклофибробетон не подвержен коррозии и относится к негорючим материалам. Применение стекловолокна способствует получению изделий с гладкой поверхностью, рекомендуется для изготовления тонкостенных изделий с поперечным сечением 5–20 мм небольшой массы.

Стеклофибробетонные изделия проявляют высокую химическую стойкость и, как следствие, отличаются долговечностью, что делает их применимыми в путепроводах и в конструкциях автомобильных тоннелей, пролетных строений, в системах дорожного водоотвода. Возможность быстрого переоснащения линии стеклофибробетонных изделий позволяет производить широкую номенклатуру продукции, включающую архитектурные облицовочные панели, изделия для навесных фасадов, ограждения балконов и лоджий, элементы дренажных систем и др.

При устройстве защитных и гидроизоляционных покрытий возможно применение стеклоцементных материалов с содержанием стекловолокна в количестве 2–3 % от массы вяжущего.

В последние годы большое внимание уделяется использованию в фибробетонах базальтового волокна. Такие бетоны получили название базальтофибробетоны (БФБ). Учитывая, что базальт составляет 65 % земной коры, это практически неиспользованный резерв для получения эффективных волокон. Из БФБ изготавливаются сваи трубчатых изделий и многих других, в том числе мостовых конструкций, дорожных покрытий.

## ГЛАВА 4. БЕТОНОПОЛИМЕРЫ

### 4.1. Основные понятия

Многолетний опыт применения бетона как одного из основных строительных материалов показал необходимость повышения его прочностных и эксплуатационных характеристик, которые снижаются при воздействии агрессивных сред или циклическом замерзании и оттаивании, способных привести к разрушению конструкций. Повышение долговечности бетона может быть достигнуто модифицированием его структуры путем применения полимеров — веществ органического и неорганического происхождения.

Существуют следующие способы повышения качества бетона с применением полимеров, отличающиеся преимуществами и областью применения:

- введение полимерных добавок в бетонную смесь совместно с пластифицирующими веществами, такие бетоны называются полимерцементными;
- применение полимерных добавок в качестве основного связующего (вяжущего); такие бетоны называются полимербетонами;
- применение мономеров или полимеров в качестве специального пропиточного состава с дальнейшей полимеризацией непосредственно в теле бетона; такие бетоны называются бетономиполимерами.
- применение армирующих полимерных волокон; такие бетоны носят название дисперсно-армированных полимерными волокнами.
- введение в состав бетона легких заполнителей на основе полимеров или заполнителей, модифицированных полимерами;
- применение микрозаполнителей на основе полимеров.

### 4.2. Бетонополимеры

Основной целью пропитки бетона полимерными составами является изменение его свойств и получение качественно нового строительного материала, — **бетонополимера**. Отличительной особенностью бетонополимера является высокая прочность, повышенная долговечность, высокая химическая стойкость по отношению к агрессивным средам.

Получение бетонополимеров включает следующие технологические операции:

- сушку бетонного или железобетонного изделия;
- пропитку изделия специальным составом и его дальнейшую полимеризацию, как правило, в результате термokatалитической реакции, а иногда и радиационным способом.

Применение таких технологических приемов, как обработка бетонных поверхностей полимерами, способствует не только значительному улучшению свойств существующего материала, но и обретению им совершенно новых, исключительных качеств, несвойственных обычному бетону.

В табл. 4.1 приведены основные свойства бетонополимера на основе сложных метиловых эфиров метакриловой кислоты (метилметакрилата).

В зависимости от вида применяемого бетона различают:

- *тяжелые бетонополимеры*, полученные обработкой тяжелого бетона разнообразными составами (средняя плотность таких бетонов находится в пределах  $1800 \text{ кг/м}^3$  и выше);
- *легкие бетонополимеры*, полученные обработкой легкого бетона, включая ячеистые бетоны и бетоны на пористых заполнителях.

К *пропиточным составам* для бетонополимеров можно отнести искусственные мономеры и полимеры (стирол, бутилстирол, метилметакрилат, эпоксистирол, винилацетат, метилакрилат, акрилонитрил и др.); органические материалы (битум, парафин и др.); составы на основе серы; составы на основе жидкого стекла и др.

Несмотря на то, что такие материалы, как сера и жидкое стекло не относятся к полимерам, и технология их нанесения несколько отличается от технологии обработки полимерами, материалы, пропитанные различными составами, принято называть бетонополимерами.

Основные свойства бетонополимера и немодифицированного бетона

Показатели	Бетонополимер	Немодифицированный бетон
Предел прочности при сжатии, МПа	100–200	30–50
Предел прочности при растяжении, МПа	6–19	2–3
Предел прочности при изгибе, МПа	14–28	5–6
Модуль упругости при сжатии, МПа	$(3,5–5) \cdot 10^4$	$(2,5–3,5) \cdot 10^4$
Предельные деформации при сжатии	0,002	0,001
Прочность сцепления с арматурой, МПа	10–18	1–2
Водопоглощение, %	1	3–5
Динамическая прочность при растяжении ( $\tau = 10^3$ МПа · с)	30	7
Деформации усадки	$(0–5) \cdot 10^{-5}$	$50 \cdot 10^{-5}$
Деформации ползучести	$(6–8) \cdot 10^{-5}$	$(40 – 60) \cdot 10^{-5}$
Электрическое сопротивление, Ом	$10^{14}$	$10^5$
Морозостойкость, циклы	5000	200
Коррозионная стойкость к кислотам и сульфатам	Высокая	Недостаточная

Бетонополимеры, пропитанные полимером, подразделяются на материалы, получаемые термокаталитической реакцией или радиационной полимеризацией.

По степени обработки бетона пропитывающим составом они различают:

- бетонополимеры с практически полной пропиткой всего объема бетона;
- бетонополимеры с обработкой только отдельных зон или поверхности бетона, носящие название бетонополимеров с зонной или поверхностной обработкой. Такой вид обработки осуществляется при невысоких расходах мономера, находящихся в диапазоне 1,5–3 кг на 1 м<sup>2</sup> бетона, что обеспечивает повышение морозостойкости, коррозионной стойкости и других свойств в несколько раз.

**Области применения бетонополимеров.** Улучшение свойств бетонных и железобетонных конструкций возможно с помощью поверхностной и зональной обработки специальными составами на основе полимерных материалов. Бетонополимеры получили широкое применение в гидротехнике, промышленных сооружениях, на транспорте и во многих других случаях. К ним относятся ограждения балконов, элементы лестничных маршей, нагревательные панели, декоративные изделия повышенной долговечности, изделия, работающие в особых условиях: трубы, элементы отстойников для ряда агрессивных жидкостей, детали градирен, износостойкие плиты водосбросов, трубы, плиты облицовки каналов, изделия для мелиоративных работ и др.

Все более широкое распространение получает ремонт и восстановление железобетонных конструкций в различных областях: гидротехнике, промышленных сооружениях, на транспорте и во многих других случаях. Ремонт поверхностных повреждений осуществляют различными способами: обработкой специальными составами на основе неорганических вяжущих (например, на основе жидкого стекла, серы и ряда других), полимеррастворами и полимербетонами, обычными растворами или бетонами, в том числе с дисперсным армированием, с последующей пропиткой ремонтного слоя и зоны сцепления полимеризующимися составами для повышения монолитности конструкции и долговечности ее поверхности.

### 4.3. Полимербетоны

Бетоны, изготовленные на неорганических заполнителях, в которых в роли вяжущего выступают различные полимерные соединения, носят название **полимербетонов**. В целях улучшения свойств полимербетонов и снижения содержания связующего вводятся тонкомо-

лотые наполнители, а для улучшения свойств и ускорения твердения и применяют пластифицирующие, отверждающие и другие специальные добавки.

В качестве связующего наибольшее применение получили термореактивные фурановые, эпоксидные, полиэфирные и акриловые смолы, отверждение которых происходит при обычных или повышенных температурах.

*Фурановые смолы* относятся к группе соединений, в молекулярной структуре которых присутствует гетероциклический радикал (фурановое кольцо).

Фурановые смолы получили в строительстве наибольшее применение, отличаются невысокой стоимостью и являются продуктом конденсации фурфурола и фурфурилового спирта с фенолами и кетонами.

*Эпоксидные смолы* представляют собой соединения линейного строения, содержащие эпоксигруппы. Широкое применение в производстве полимербетонов получили жидкие эпоксидные смолы ЭД-5, ЭД-6 и др., отверждаемые катализаторами ионного типа.

Применяются холодное и горячее отверждение эпоксидных смол. Холодное отверждение эпоксидной смолы может производиться в присутствии полиэтиленполиамина и гексаметилендиамина, вводимых в количестве 10–12 и 15–20 % от массы связующего соответственно. Возможно применение полиамидных, тиокольных, полиэфирных отвердителей.

Температура оказывает существенное влияние на скорость отверждения. Введение пластификаторов в эпоксидные связующие повышает их деформативные свойства.

*Полиэфирные смолы* представляют собой соединения на основе поликонденсации малеиновой, фталевой кислот и многоатомных спиртов. Основное применение получили полиэфирмалеинаты и полиэфирокрилаты, отверждаемые при обычных температурах в присутствии катализаторов на основе перекиси метилэтилкетона, циклогексанона, бензоила и др.

В случае использования фурановых и формальдегидных связующих совместно с кислотными отвердителями возникает необходимость применения кислотостойких заполнителей, к которым нельзя отнести заполнители на основе карбонатных пород (известняковые, доломитовые и др.).

В случае использования полиэфирных и эпоксидных связующих в полимербетонах существуют неограниченные возможности по применению заполнителей с различным химическим составом, в том числе известково-магнезиальные карбонатные породы.

Основные характеристики полимербетонов находятся в прямой зависимости от технологии получения, вида применяемого связующего и состава бетона. В табл. 4.2 приведены сравнительные характеристики основных свойств цементного бетона и полимербетонов на различных связующих. Полимербетоны на эпоксидных связующих обладают повышенной прочностью, стойкостью к истиранию, высокой химической стойкостью, водостойкостью, высокой клеящей способностью.

Таблица 4.2

**Основные характеристики полимербетонов**

Показатели	Связующее				
	ПЦ	Фенольное	Фурановое	Полиэфирное	Эпоксидное
Прочность при сжатии, МПа	30	20	50	80	100
Линейная усадка, %	0,001	—	0,5	1,5	0,2
Мера ползучести, см <sup>2</sup> /кг	0,2	—	0,5	0,4	0,3
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$	10	30	30	30	30
Пористость, %	20	2	2	1	1
Объемное омическое сопротивление, Ом·см	10	10	10	10	10
Стойкость к нагреву, °С	200	160	180	100	120
Стойкость, баллы (по десятибалльной шкале):					
к старению	10	4	4	5	6
воде	10	8	7	6	8
щелочам	9	2	8	2	10
кислотам	1	8	10	8	6

В полимербетонах расход связующего напрямую зависит от пустотности, содержания мелких фракций и удельной поверхности заполнителя. Чем больше эти показатели, тем большим будет расход смолы и отвердителя. Для снижения расхода связующего и снижения усадки, ползучести и температурных деформаций полимербетонов применяются тонкомолотые графит, андезит, молотый кварцевый песок и др.

При подборе состава полимербетона пользуются методом абсолютных объемов. Расход связующего рассчитывается как сумма объема пустот в микрозаполнителе с 10–20 % от этого объема. Не рекомендуется применять повышенное количество связующего, что может послужить причиной снижения прочности, увеличения показателей усадочных и температурных деформаций бетона. Расход отвердителя устанавливается экспериментально.

Полимербетоны получили широкое применение в таких конструкциях, подвергающихся агрессивным и истирающим воздействиям, как конструкции химических производств, водосливы гидротехнических сооружений, трубопроводы и сантехнические изделия. Широкое применение полимербетонов ограничено их повышенной ползучестью и невысокой термостойкостью.

# ГЛАВА 5. ДРЕВЕСНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ

## 5.1. Общие понятия

**Древесные композиционные материалы (ДКМ)** представляют собой материалы, состоящие из армирующего наполнителя на основе древесины и матрицы органического или неорганического происхождения.

Древесный наполнитель (табл. 5.1) воспринимает механические нагрузки и придает высокую прочность материалу, а матрица (связующее, вяжущее) связывает древесный наполнитель, обеспечивает древесине стабильность при сорбции и десорбции, заполняя ее поры и пустоты.

Древесина, являясь продуктом органического происхождения на основе высокомолекулярных веществ, имеет сложный химический состав и волокнистое строение.

Таблица 5.1

Виды древесных наполнителей

Вид наполнителя	Области применения
Волокно	Древесноволокнистые и гипсоволокнистые и плиты
Дробленка	Арболит
Древесная стружка (шерсть)	Фибролит, представляет собой волокна длиной 50 мм, шириной от 2 до 5 мм и толщиной от 0,2 до 0,7 мм
Резаная стружка	Цементно-стружечные плиты, магнезиальные стружечные плиты, изделия из древесных прессовочных масс и древесно-клеевых композиций, получается специальной обработкой древесины на стружечных станках барабанного типа
Стружка	Арболит и изделия из древесных прессовочных масс, выполняет роль наполнителя и является отходом, получаемым обработкой древесины на строгальных, фрезерных и других станках
Опилки	Гипсоопилочные блоки, опилкобетон, ксилолит, изделия из древесных прессовочных масс
Древесная крошка	Древесные прессовочные массы, является отходом фанерного производства и представляет собой частицы, полученные дроблением кускового шпона при производстве фанеры
Кора	Королит, представляет собой материал в виде частиц размером 10–40 мм

В зависимости от природы связующего (матрицы) древесные композиционные материалы подразделяют на три группы.

В *первую группу* входят композиционные материалы на основе матрицы из неорганических вяжущих веществ. В этом случае вяжущим может выступать:

- портландцемент и его разновидности, композиционные материалы на его основе — арболит, фибролит, опилкобетон, цементно-стружечные плиты и др.;
- гипсовые вяжущие, композиционные материалы на их основе — гипсоволокнистые листы и гипсостружечными плиты;
- магнезиальные вяжущие, композиционные материалы на их основе — ксилолит, магнезиальный фибролит,

Во *вторую группу* входят материалы на основе синтетических полимерных связующих. К ним относятся древесно-слоистые пластики, древесные прессовочные массы, древесно-клеевые композиции, древесноволокнистые и древесностружечные плиты, модифицированная древесина. Основой полимерной матрицы служат синтетические фенолформальдегидные, карбамидоформальдегидные и другие связующие.



Материалы, изготовленные на основе связующего из природных клеящих веществ или продуктов гидролитического расщепления углеводородного комплекса древесины относятся к *третьей группе*. Основными представителями являются лигноуглеводные древесные пластики и пьезотермопластики, изготавливаемые высокотемпературной обработкой пресс-массы из древесных наполнителей без применения специальных связующих.

## 5.2. Влияние древесных наполнителей на структурообразование минеральных вяжущих

Обладая целым рядом положительных свойств — легкостью обработки, малой средней плотностью, недефицитностью, хорошей смачиваемостью — древесные наполнители могут оказывать негативное воздействие на процессы гидратации минеральных вяжущих, что связано с химическим составом древесины.

Агрессивные свойства целлюлозосодержащих наполнителей достаточно хорошо изучены. Составляющими веществами древесины, как материала органического происхождения, являются целлюлоза, содержание которой достигает 50 % всей массы древесины, лигнин, гемицеллюлоза и дубильные вещества (таннины).

Целлюлоза, лигнин, таннины и смолистые вещества не оказывают вредного влияния на твердение прочностные свойства портландцемента.

Гемицеллюлоза состоит из сложных органических соединений, являющихся полисахаридами, которые в щелочной среде цементного камня подвергаются гидролизу с переходом в агрессивные по отношению к цементному камню водорастворимые сахара.

Даже небольшие количества простейших водорастворимых сахаров, называемых цементными ядами и содержащихся в древесине (0,1–0,5 % по массе), находясь под воздействием щелочной среды, вымываются из нее и переходят в цементное тесто, существенно замедляя процесс твердения и их эффект аналогичен действию поверхностно-активных веществ. Содержание простейших водорастворимых сахаров будет зависеть от применяемой породы древесины, сроков и условий ее хранения.

Щелочная среда гидратирующегося цемента способствует выделению цементного яда, который осаждается на поверхности частиц клинкерных минералов в виде тончайших оболочек, изолирует их от воды и замедляет процессы гидролиза и гидратации.

Существуют способы снижения негативного влияния, которые включают: частичное удаление легкогидролизуемых веществ из древесного наполнителя; перевод водорастворимых сахаров в нерастворимые или безвредные для цемента соединения; ускорение сроков твердения портландцемента с сокращением времени воздействия сахаров.

## 5.3. Фибролит

**Фибролит** (wood wool cement board) — это строительный плитный материал, представляющий собой спрессованную и затвердевшую массу специально приготовленной смеси, состоящей из древесной стружки (или древесной шерсти) и минерального вяжущего на основе портландцемента или каустического магнезита.

В нашей стране впервые в 1929 г. было открыто производство фибролитовых плит на магнезиальном вяжущем, а в 1938 г. в Таллине построен завод по производству портландцементного фибролита.

В соответствии с ГОСТ 8928–81 «Плиты фибролитовые на портландцементе. Технические условия» фибролитовые плиты изготавливаются методом прессования из специально приготовленной смеси, состоящей:

- из специально изготовленной стружки на древесно-шерстных станках в соответствии ГОСТ 5244–79 «Стружка древесная. Технические условия»;
- минерального вяжущего на основе каустического магнезита или портландцемента марки не ниже М400 в соответствии с ГОСТ 10178–85 «Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия»;
- химических добавок и воды.

Фибролитовые плиты являются трудногораемым и биостойким материалом, эксплуатируемым в конструкциях с относительной влажностью воздуха менее 75 %. Их подразделяют на три марки:

- Ф-300 — теплоизоляционный фибролит;
- Ф-400 — конструкционно-теплоизоляционный фибролит;
- Ф-500 — акустический фибролит.

Основные свойства фибролитовых плит представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Основные свойства фибролитовых плит

Показатели	Нормативные показатели		
	Ф-300	Ф-400	Ф-500
Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	250–350	351–450	451–500
Предел прочности при изгибе, МПа, не менее для плит толщиной, мм:			
30	–	1,1	1,3
50	0,6	0,9	1,2
75	0,4	0,7	1,1
100	0,35	0,6	1,0
Модуль упругости при изгибе, МПа, не менее	–	300	500
Влажность по массе, %, не более	20	20	20
Водопоглощение по массе, %, не более	35	40	45
Теплопроводность плит в сухом состоянии при температуре 20 ± 2 °С, Вт/(м · °С), не более	0,08	0,09	0,1

Для защиты фибролита от внешних климатических воздействий в большинстве случаев предусматривается оштукатуривание их поверхности или защита слоем бетона.

Фибролитовые плиты выпускаются длиной 2400 и 3000 мм; шириной 600 и 1200 мм; толщиной 30, 50, 75, 100 и 150 мм.

Основные свойства и структура фибролита зависят от состава фибролитового волокна. Применяемая древесная шерсть имеет длину 400–500 мм, ширину 4–7 мм и толщину 0,25–0,5 мм (рис. 5.1). В целом для производства 1 м<sup>3</sup> фибролитовых плит расходуется приблизительно 115 кг фибролитового волокна.



Рис. 5.1. Внешний вид древесной шерсти

Для изготовления акустических фибролитовых плит применяется более толстая и узкая древесная шерсть шириной 1–2 мм. При повышении толщины ленты свыше 0,5 мм ее свойства изменяются, эластичность снижается, что способствует повышению ломкости. Для устранения этого недостатка и снижения ломкости уменьшают ширину с увеличением толщины ленты. При этом содержание лент фибролитового волокна в составе длиной от 250 до 500 мм должно быть более 75 %.

Основной задачей в технологии производства фибролита является устранение негативного влияния водорастворимых сахаров, выделяющихся из древесины при гидратации портландцемента и способных замедлять схватывание вяжущего и снижать щелочность цементного теста. Для предотвращения негативного влияния применяются различные химические добавки-минерализаторы: хлорид кальция ( $\text{CaCl}_2$ ), силикаты натрия и калия в виде жидкого стекла, известь строительная,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , сода, сульфат натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

Большинство химических добавок-минерализаторов являются ускорителями схватывания и твердения, применение которых не только сокращает время воздействия растворимых сахаров на портландцемент, но и активизирует его твердение.

Технология производства фибролита может вестись по мокрому и сухому способам. При мокром способе производства древесную стружку предварительно пропитывают в емкости с водной суспензией цемента и минерализатора, после чего ее остатки удаляют на виброгрохоте. При производстве по мокрому способу для предотвращения расслоения цементной суспензии необходимо ее постоянное перемешивание или введение большего количества воды, которое снижает свойства получаемых изделий.

При сухом способе производства, который получил наибольшее распространение, предварительно приготовленное фибролитовое волокно сначала пропитывают раствором минерализатора, а потом смешивают в определенном соотношении с цементом. Полученная сырьевая шихта укладывается в формы, прессуется и предварительно выдерживается в камере дозревания в течение 8–24 ч для обеспечения схватывания и придания начальной прочности портландцементу в зависимости от вида вяжущего и средней плотности плит. При достижении распалубочной прочности изделия извлекаются из форм, производится обрезка неровностей на боковых и торцевых кромках и изделия направляются на тепловую обработку.

Процессу производства фибролитовых плит предшествует изготовление самого фибролитового волокна, которое заключается в доставке древесины на склад сырья, ее окоривания и выдерживания на складе в течение нескольких месяцев. Далее производят разделку на заготовки (чураки) длиной 500 мм, из которых на древошерстных станках производят фибролитовые древесные волокна (древесную шерсть). В настоящее время фибролитовые плиты изготавливаются по инновационной технологии GreenBoard. Благодаря многочисленным преимуществам они являются качественной заменой традиционных плитных материалов.

Акустические декоративные плиты на белом цементе изготавливаются на древесной шерсти, имеющей ширину волокна 1; 1,5 и 2 мм. Такие плиты применяются в театрах, студиях, ресторанах, спортивных комплексах, тирах, офисах, паркингах, имеют толщину от 14 до 25 мм и длину 250 мм. Конструкционные плиты используют в жилищно-гражданском строительстве, при строительстве общественных, спортивных, промышленных зданий и сооружений, в агропромышленном и сельскохозяйственном комплексах. Их изготавливают с применением волокна смешанного типа на обычном портландцементном вяжущем. Они имеют длину 2800 и 3000 мм, ширину 600 мм и толщину от 10 до 100 мм в зависимости от типоразмера изделия.

Состав фибролитовых плит GreenBoard:

- 60 % древесной шерсти;
- 39,8 % белого или обычного портландцемента;
- 0,2 % силиката натрия (жидкого стекла).

Производство фибролитовых плит по конвейерной технологии включает следующие технологические операции. Сырьевые материалы автомобильным транспортом поступают на склад сырья. Применяются как лиственные, так и хвойные породы древесины.

Далее производится сортировка по длине, толщине и назначению. Отсортированная древесина при помощи погрузчика подается на приемное устройство окорочного станка. Освобожденные от коры бревна разделяются на заготовки длиной 2000 мм, которые поступают на склад длительного хранения, где их укладывают в штабели и выдерживают в течение весенне-летнего периода для влажности древесины. После выдерживания древесина поступает по транспортеру на пост распилки, где древесина распиливается на чураки длиной 500 мм, складывается в металлические контейнеры, поступающие далее в цех приготовления древесной шерсти.

Для изготовления фибролитовых плит используется древесное волокно длиной 250 мм и толщиной от 1 до 3 мм, которое изготавливается из полуметровых чураков (заготовок) на строгальном станке производства фирмы Eltomation. Станок распиливает чураки на две равные части, после чего выполняется операция строгания древесины. После строгального станка полученная таким образом древесная шерсть поступает на транспортер и в накопительный бункер, работающий вместе с системой аспирации воздуха. Далее древесное волокно направляется в отделение приготовления смеси, предварительно пройдя узел смачивания, т.е. обработку минерализатором. Минерализацию древесной шерсти для фибролита осуществляют путем ее окунания или обрызгивания 3–4 % водным раствором хлористого кальция или жидкого стекла. Влажность минерализованной шерсти составляет 140–160 %. Далее влажная масса из шерсти совместно с портландцементом направляется в смеситель принудительного действия для приготовления фибролитовой смеси, в котором происходит их совместное перемешивание без уплотнения и навивания шерсти на вал. Далее фибролитовая смесь поступает на распределительную машину, которая обеспечивает равномерное распределение смеси на поддонах. Пустые поддоны в автоматическом режиме очищаются и смазываются. После заполнения фибролитовой смесью движущихся непрерывно по роликовому конвейеру поддонов они направляются к специальным устройствам для обеспечения ровного края и подпрессовочному ролику, который уплотняет и укатывает смесь на поддоне. Затем непрерывный ковер фибролитовой смеси разрезается между торцами форм пилой. Далее штабелирующая машина укладывает заполненные смесью поддоны в штабель из 16–18 поддонов, который поступает под гидравлический пресс, где происходит прессование плит до заданной толщины и фиксация в пресс-форме при удельном давлении, равном 0,06–0,1 МПа; более тяжелые плиты прессуют при удельном давлении 0,25–0,4 МПа.

В пресс-форме фибролитовая смесь схватывается и приобретает первоначальную прочность. После этого штабель при помощи погрузчика направляется на пост автоматической распалубки, при этом отделение фибролитовой плиты от поддона осуществляется посредством его переворачивания на 180°. Распалубленные изделия штабелируются на технологические поддоны и направляются на пост выдерживания в течение 14–21 сут для продолжения набора прочности. После этого изделия поступают на финишную обработку плит, включающую их сушку в сушильной камере непрерывного действия, калибровку по толщине на шлифовальном станке и обрезку кромок плит по всем сторонам и нанесение фасок профилированного края. После торцовки плиты поступают на окраску в распылительную камеру. Окрашенные плиты подвергаются сушке в сушильной камере. Готовые плиты собираются в штабель и упаковываются. Для защиты штабель покрывается полиэтиленовой пленкой.

Изготовление фибролитовых плит возможно на белом (акустические плиты) и обычном портландцементе (конструкционные плиты).

На основе фибролитовых плит изготавливаются структурно-изоляционные панели, в зарубежной литературе носящие название SIP-панели (Structural Insulated Panel) и представляющие собой двух- и трехслойную панель со средним слоем из термоизоляционного материала, например, пенополистирола, пенополиуретана или минеральной ваты. Толщина среднего слоя обычно составляет от 40 до 90 мм, в то время как внешние слои имеют толщину от 5 до 10 мм. В этом случае уровень термоизоляции значительно увеличивается.

На основе многолетнего опыта голландская фирма Eltomation разработала новый тип плиты высокой плотности с повышенной прочностью, получаемой прессованием до средней плотности, равной 1100 кг/м<sup>3</sup>. На стандартной автоматизированной заводской линии с обо-

рудованием фирмы Eltomation производятся как древесно-цементные плиты низкой плотности (360–570 кг/м<sup>3</sup>), так и плиты повышенной плотности — до 1100 кг/м<sup>3</sup> и шириной 60 см.

В 2010 г. компания Eltomation разработала технологию и оборудование технологической линии для выпуска фибролитовых стеновых панелей для строительства домов и коттеджей длиной 6000 мм, шириной до 3000 мм и толщиной 400–500 мм. Эта автоматизированная производственная линия выпускает от 22 до 28 полноформатных стеновых панелей в смену.

Средние значения расхода древесной шерсти, м<sup>3</sup>, и цемента, кг, следующие:

- для марки 300 — 0,4 и 190 соответственно;
- марки 400 — 0,55 и 240;
- марки 500 — 0,82 и 270.

Влажность смеси для получения плит хорошего качества должна поддерживаться в пределах 45–50 %.

Ранее были доступны плиты из фибролита только импортного производства, в настоящее время их выпуск освоен несколькими отечественными завода, они соответствуют ТУ 5768-049-01227131-2004. Плиты имеют четкую прямоугольную форму, кромку повышенной жесткости, что позволяет обеспечивать плотную и равномерную укладку материала при монтаже конструкций. Плиты выпускают размером 2400 × 550 × 75 мм.

Фибролит применяется в качестве несъемной опалубки при сооружении стен, перегородок, перекрытий в зданиях, возводимых при монолитном бетонировании и в деревянно-каркасном домостроении, например, при строительстве многоэтажных зданий, коттеджей, хозяйственных построек, а также при реконструкции и ремонте зданий. Применение метода несъемной опалубки обеспечивает качественно новый метод, более чем в 1,5 раза сокращается время строительства по сравнению с традиционными методами; дает возможность использовать один и тот же материал для реконструкции и устройства стен, покрытий, надстройки, утепления внешних стен, выполнения многовариантных архитектурно-планировочных решений, включая исполнение криволинейных поверхностей. В этих областях строительства фибролит используется как конструкционный, тепло- и звукоизоляционный материал для обшивки стен, чердаков, устройства кровель, подвалов; декоративный материал для внутренней отделки помещений; в качестве звукопоглощающего и звукоизолирующего материала в помещениях с высоким уровнем шума.

Система строительства с применением несъемной опалубки из фибролита детально разработана австрийской фирмой Velox. Отсутствие подъемных кранов, малая номенклатура строительных материалов, простая организация работ, сокращение объема перевозки и хранения материалов позволяют существенно сократить трудозатраты и общую стоимость объектов строительства. Именно поэтому представляемая технология интересна как для высокоиндустриального строительства, так и для потребительской ниши, где применяются ручные технологии жилищного строительства, что с учетом ее положительных свойств открывает возможности массового строительства доступного жилья малыми и средними организациями на площадках, не имеющих инфраструктуры и отдаленных от транспортных магистралей.

Высокие теплоизоляционные свойства фибролита и возможность производить заливку бетонного раствора сразу на целый этаж здания дают возможность применения этого материала в условиях Крайнего Севера при отрицательных температурах.

Стены из фибролитовых плит толщиной 15 см по термическому сопротивлению приравниваются к кирпичным стенам толщиной в два кирпича. Оштукатуренные фибролитовые стены несут нагрузку штукатурного слоя, способствуя паровой диффузии («дышащие стены») с увеличением огнестойкости помещения. При возведении внутренних стен и перегородок используется фибролит, армированный рейками, что обеспечивает сохранение геометрических форм при укладке бетона. Своеобразную структуру фибролита можно сделать привлекательной благодаря разнообразию тонов расцветки, и таким образом, дополнительная обработка не нужна. С этой точки зрения фибролит просто идеален при отделке больших сооружений (спортивных комплексов, производственных помещений, бассейнов и т.д.), окрашенный фибролит со встроенными деревянными рейками в сочетании с пенополистирольными или минераловатными плитами создают эффективный дизайн стен и покрытий.

## 5.4. Арболит

**Арболитом** (wood concrete) называется строительный материал, относящийся к органическим теплоизоляционным материалам, являющийся разновидностью легкого бетона и изготовленный из тщательно подобранной смеси минерального вяжущего, органических заполнителей, химических и порообразующих добавок и воды. Как правило, арболит применяется при строительстве малоэтажных домов высотой до трех этажей.

Древесный наполнитель изготавливают на специальных рубительных машинах и подвергают обработке минерализаторами для устранения негативного влияния растворимых сахаров других веществ, которые препятствуют развитию процесса гидратации портландцемента и сцеплению наполнителя с цементом.

В качестве минерального вяжущего могут применяться портландцемент, соответствующий ГОСТ 31108–2016 «Цементы общестроительные. Технические условия», сульфатостойкий портландцемент в соответствии с ГОСТ 22266–2013 «Цементы сульфатостойкие. Технические условия», белый портландцемент по ГОСТ 965–89 Портландцементы белые. Технические условия» и цветной портландцемент по ГОСТ 15825–80 «Портландцемент цветной. Технические условия».

Для производства арболита применяют такие органические наполнители, как дробленые отходы, полученных из органического древесного технологического сырья посредством дробления и дальнейшего отсева, костра льна или дробленые стебли хлопчатника, костра конопли, дробленая рисовая солома.

Используемые заполнители производят из древесины ели, сосны, кедра, пихты, березы, ольхи, липы, тополя, осины и других пород и их смесей. При этом органические заполнители поставляют на предприятие как отдельно по породам, так и в смешанном виде в различных соотношениях.

В качестве химических добавок для арболитовой смеси, вводимых в виде водных растворов, применяют известь, хлорид кальция, силикаты натрия и калия в виде жидкого стекла с силикатным модулем  $n = 2,4 - 3$ , известь строительная,  $Al_2(SO_4)_3$  и силикат-глыба. Допускается применение в арболитовых смесях порообразующих и комплексных добавок.

Формирование свойств композиционных материалов в целом происходит с одной стороны под влиянием параметров исходных компонентов, с другой стороны — в результате взаимодействия этих компонентов на границе раздела фаз. Учет такого взаимодействия особенно важен для древесных композиционных материалов, так как в них в результате взаимодействия изменяются как свойства частиц древесины, так и связующего компонента. При этом связующее, адсорбируясь в приповерхностные слои частиц древесины, способствует к возникновению в древесине областей, обладающих особыми свойствами. Кроме того, в свою очередь, древесина влияет на приповерхностные слои связующего, вызывая также формирование в связующем областей с аномальными свойствами. Отсюда следует, что, целенаправленно воздействуя на межфазное взаимодействие в древесных композиционных материалах можно регулировать их свойства в нужных направлениях.

Основным достоинством арболита является его невысокая средняя плотность, находящаяся в пределах  $500-850 \text{ кг/м}^3$  и низкая теплопроводность  $0,08-0,17 \text{ мВт/(м} \cdot \text{°C)}$ , простота изготовления, биостойкость, трудносгораемость и долговечность.

Прочность арболита при сжатии и растяжении при изгибе находится в пределах  $0,5-3,5 \text{ МПа}$  и  $0,4-1,0 \text{ МПа}$  соответственно. По прочности при сжатии его подразделяют на классы или марки.

В зависимости от средней плотности в высушенном состоянии и применяемого древесного заполнителя выпускают:

- арболит теплоизоляционный — плотностью  $\rho = 400 - 500 \text{ кг/м}^3$  с марками по прочности при сжатии М5, М10, М15;
- арболит конструкционный — плотностью  $\rho = 500 - 850 \text{ кг/м}^3$  с марками по прочности при сжатии М25, М35 и М50.

В случае применения арболита в наружных отделочных слоях его марка по морозостойкости должна быть не менее:

- F25 — в конструкциях, эксплуатируемых при относительной влажности воздуха менее 60 %;
- F35 — в конструкциях, эксплуатируемых при относительной влажности воздуха 60–75 %;
- F50 — в конструкциях, эксплуатируемых при относительной влажности воздуха более 75 %, и для бетонов (растворов) наружного отделочного слоя.

В табл. 5.3 приведены основные параметры арболита.

Таблица 5.3

**Основные физико-механические и технологические параметры арболита**

Показатели	Древесная дробленка из отходов	
	лесопиления и деревообработки	лесозаготовок
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	400–800	500–850
Прочность при сжатии, МПа	0,5–5,0	
Прочность при изгибе, МПа	0,7–1,0	
Модуль упругости, МПа	250–2300	
Морозостойкость, не менее, циклы	25–75	
Водопоглощение, %	40–85	
Усадка, %	0,4–0,5	
Сорбционное увлажнение (при относительной влажности 40–90 %), %	4–8	4,5–12
Биостойкость	Биостойкий (V группа)	
Огнестойкость, ч	0,75–1,5 ч	
Коэффициент звукопоглощения (при частотах звука 125–2000 Гц)	0,17–0,6	

Приготовление арболитовых смесей осуществляется в соответствии с требованиями ГОСТ 19222–84 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия». При укладке арболитовой смеси ее температура не должна быть ниже 15 °С. В табл. 5.4 представлен примерный расход материалов для приготовления арболита в соответствии с его марками.

Таблица 5.4

**Ориентировочный расход материалов на изготовление 1 м<sup>3</sup> арболита по маркам**

Материалы	Расход материалов в зависимости от марки арболита			
	10	15	25	35
Заполнитель, кг	180–190	200–210	220–230	240–250
Портландцемент М400, кг	280–300	300–330	330–360	360–400
Хлористый кальций (CaCl <sub>2</sub> ), кг	8	8	8	8
Вода, л	330–360	360–390	390–430	430–480

*Примечание.* В таблице приводятся верхние пределы расхода материалов для приготовления арболитовых смесей в случае применения отходов лесозаготовительных предприятий.

**Технология производства арболитовых изделий.** Технологический процесс производства арболита близок к процессу производства обычного бетона, только присутствуют некоторые особенности, обусловленные введением древесного сырьевого материала.

Производство состоит из следующих технологических переделов:

- подготовка заполнителя;
- дозирование компонентов;

- перемешивание бетонной смеси;
- подача смеси к посту формования изделий;
- формование;
- тепловая обработка;
- выдержка;
- хранение готовой продукции.

Зарубежные аналоги арболита: в Швейцарии — дюрисол, в США и Канаде — вундстроун, в Чехии — пилинобетон, в Японии — чентери боард, в Германии — дюрипанель, в Австрии — велокс. Они применяются в малоэтажном и высотном строительстве.

Отличительной особенностью строительства с использованием арболита является уменьшение массы зданий и сокращение трудоемкости их возведения с одновременным снижением расходов сырьевых материалов.

В индивидуальном строительстве особенно ощутим экономический эффект при возведении несущих стен из блоков арболита: при толщине стен 390 мм наблюдается экономия до 60 % стенового материала, при этом сокращаются расходы по обогреву (охлаждению) помещений в неблагоприятный климатический период года в 2,5 раза.

## **5.5. Цементно-стружечные плиты**

**Цементно-стружечные плиты (ЦСП)** (cement bonded particle board) представляют собой строительный композиционный материал на основе деревянной стружки, портландцемента, специальных химических добавок и воды.

Цементно-стружечные плиты обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными древесными материалами, применяемыми в строительстве, являются негорючими, нетоксичными, био- и атмосферостойкими. Основные недостатки цементно-стружечных плит: большая плотность, невысокое сопротивление ударным нагрузкам и трудность обработки.

Впервые способ получения цементно-стружечных плит был предложен в 1930-х годах в США, но практическое внедрение получил лишь в 1974 г. в виде цементно-стружечной плиты под названием «дюрипанель» — совместной разработки швейцарской фирмы Durisol и немецкой фирмы Bison-Verke. Вскоре после запуска первого завода по выпуску ЦСП было построено и запущено в производство еще около 40 заводов по всему миру.

В Советском Союзе выпуск этих плит начат с конца 1980-х гг. Так, в 1983 г. Костромской опытно-экспериментальный завод впервые выпустил ЦСП на оборудовании фирмы Bison. В настоящее время в России цементно-стружечные плиты производятся на многих предприятиях.

По своим физико-механическим характеристикам и структуре цементно-стружечные плиты подразделяют на две группы:

- ЦСП-1 и ЦСП-2;
- однослойные и многослойные.

Цементно-стружечные плиты ЦСП-1 применяются в качестве конструкционного материала. В табл. 5.5 и 5.6 приведены основные физико-механические характеристики ЦСП, выпускаемых в России.

На физико-механические характеристики ЦСП наибольшее влияние оказывают качество и количество применяемой древесины, содержание экстрактивных водорастворимых сахаров, фракционный состав, плотность, пористость, деформативность; количество и качество минерального вяжущего — цемента, его активность и минералогический состав; расход химических добавок и воды; плотность и толщина плит; технологические особенности производства (режимы твердения, обеспечивающие оптимальные условия твердения и структурообразования цементного камня).

Цементно-стружечные плиты объединяют в себе лучшие свойства цемента и древесины, обладают высокой прочностью, стойкостью к воздействию окружающей среды, морозостойкостью, устойчивостью к воздействию плесени.



Таблица 5.5

## Физико-механические характеристики плит ЦСП-1 и ЦСП-2

Наименование показателя	Норма для плит марок	
	ЦСП-1	ЦСП-2
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1100–1400	
Влажность, %	6–12	
Разбухание по толщине за 24 ч, %, не более	1,5	
Водопоглощение за 24 ч, %, не более	16,0	
Прочность при изгибе, МПа, не менее для плиты толщиной:		
Менее 12 мм	12,0	9,0
12–15 мм	10,0	8,0
15–19 мм	10,0	8,0
Более 19 мм	9,0	7,0
Прочность при растяжении, перпендикулярно пласти плиты, МПа, не менее	0,5	0,35
Шероховатость пласти $R_z$ по ГОСТ 7016–82, мкм, не более, для плит:		
нешлифованных	320	320
шлифованных	80	100

Таблица 5.6

## Физико-механические характеристики ЦСП и методы испытаний

Наименование показателя	Значение для плит ЦСП	Метод испытания
Модуль упругости при изгибе, МПа не менее	3500	ГОСТ 10635–78
Твердость, МПа	45–65	ГОСТ 11843–76
Ударная вязкость, Дж/м <sup>2</sup> , не менее	1800	ГОСТ 11842–76
Удельное сопротивление выдергиванию шурупов из пластин, Н/м	4–7	ГОСТ 10637–78
Удельная теплоемкость, кДж (кг · °С)	1,15	–
Теплопроводность, Вт/(м · °С)	0,26	–
Класс биостойкости	4	ГОСТ 17612–83
Снижение прочности при изгибе, % (после 20 циклов температурно-влажностных воздействий), %, не более	30	ГОСТ 26816–86
Разбухание по толщине (после 20 циклов температурно-влажностных воздействий), %, не более	5	ГОСТ 26816–86
Горючесть	Группа трудно сгораемых	СТ СЭВ 2437–80
Морозостойкость, (снижение прочности при изгибе после 50 циклов, %, не более	10	ГОСТ 8747–83

**Сырьевые материалы.** Сырьем для производства цементно-стружечных плит могут служить тонкомерная деловая древесина, кусковые отходы деревообработки и лесопиления, стружка хвойных и лиственных пород, портландцементное вяжущее, химические добавки и вода.

Перед применением древесина подвергается окорке, а потом выдерживается в течение не менее 3 месяцев на складе при положительных температурах. Содержание водорастворимых сахаров в древесине не должно превышать выше 0,5 % для хвойных пород и не более 0,2 % для лиственных. Кроме того, в древесине содержание дубильных веществ (таннинов) должно быть не более 0,4 %, масел, жиров и смол — не более 1,5 %.

Для изготовления ЦСП предпочтительнее применять хвойные породы древесины — пихту, ель, сосну, которые заготавливают в зимне-осенний период. Лиственные породы древесины можно использовать для производства ЦСП, однако при прочих равных условиях прочностные показатели плит снижаются на 10–15 %.

В качестве минерального вяжущего используется портландцемент ЦЕМ по ГОСТ 31108–2016.

В качестве химических добавок для устранения отрицательного влияния выделяющихся из древесины при гидратации портландцемента и замедляющих схватывание вяжущего и снижающих щелочность цементного теста водорастворимых сахаров применяют жидкое стекло,  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $Fe_2(SO_4)_2 \cdot nH_2O$ , CaO и  $CaCl_2$ . В производстве ЦСП основное применение получили жидкое стекло и  $Al_2(SO_4)_3$ , используется также обычная водопроводная вода.

В табл. 5.7 приведены примерные составы смесей, применяемых на предприятиях по производству цементно-стружечных плит. Отмечается возможность использования невыдержанной осины и березы по способу, разработанному в Московском государственном институте леса (МГУЛ), со следующим составом смесей для цементно-стружечных плит из расчета на  $1\text{ м}^3$ : 300–320 кг стружки из осины или березы (или их смесь) в абсолютно сухом состоянии; 500–620 кг портландцемента ЦЕМ I 42,5, 150 кг молотой извести негашеной, 80 кг  $CaCl_2$ , 420 л воды.

Таблица 5.7

Составы смесей из расчета на  $1\text{ м}^3$  цементно-стружечных плит

Исходные компоненты, кг	Состав смесей			
	Костромской завод ЦСП	Деревообрабатывающий комбинат № 5	Состав ЦНИИСК и МГУЛ	Чайковский завод ЦСП
Стружка в абсолютно сухом состоянии	280	280	260	370
Портландцемент ЦЕМ I 42,5	770	847	700	847
Ускоритель твердения	11,6 (сульфат алюминия)	12,4 (сульфат алюминия)	25 (хлорид алюминия)	12,4 (сульфат алюминия)
Жидкое стекло	27	28	30	28
Известь воздушная	–	–	20	–
Вода	470	470	400	470

**Технология производства ЦСП.** Технология производства цементно-стружечных плит состоит из следующих операций и может осуществляться на оборудовании различных производителей, поскольку существенные различия в технологических схемах отсутствуют. На рис. 3.2 приведена технологическая схема производства ЦСП с применением оборудования фирмы Eltomation.

Основными операциями по производству цементно-стружечных плит являются:

- сортировка сырьевых компонентов, их складирование;
- очистка древесины от коры (окорка) и разделка сырья на заготовки;
- выдержка древесины;
- изготовление древесных частиц и их сортировка;
- доизмельчение частиц;
- раздельное хранение стружки для различных слоев;
- приготовление цементно-стружечной смеси
- послойное смешивание компонентов;
- формирование цементно-стружечной смеси ковра;
- пакетирование в силовых тележках и их прессование;
- тепловая обработка;
- разборка пакетов и укладка плит в штабель;
- твердение плит;
- кондиционирование плит;
- обрезка кромок и сортировка и шлифование плит;
- контроль качества и складирование.

В зависимости от вида и состояния сырья, а также от применяемого оборудования некоторые операции могут быть исключены, а другие введены дополнительно.

Древесина поступает на склад сырья железнодорожным или автомобильным транспортом, ее разгружают башенным краном и подают на разобщик бревен, который поштучно выдает бревна на продольный лесотранспортер в отделение подготовки сырья. Выдержанную и рассортированную по породам древесину с открытого склада леса подают в главный корпус на окорку.

Окорку древесины выполняют на станках роторного типа ОК-63-1, а удаление гнили — на станке типа Н-10. Окоренную древесину сортируют по породам и качеству и направляют в карманные накопители для выдержки в течение 2–6 месяцев для уменьшения содержания водорастворимых сахаров, а также для более равномерного распределения влажности по сечению и длине бревен. Далее древесина ленточным конвейером направляется в стружечное отделение.

Промышленное производство цементно-стружечных плит наилучшего качества стало возможным при обработке древесины на станках с ножевым валом и получением специально резаной тонкой и гладкой стружки с размерами:

- для наружного слоя ЦСП — толщиной 0,2 мм, шириной 1,0 мм и длиной 5,0 мм;
- внутреннего слоя ЦСП — толщиной 0,4 мм, шириной 10 мм и длиной 40 мм.

Пройдя первичное измельчение, при помощи пневмотранспорта стружка поступает на классификацию с ситами, имеющими отверстия для внутреннего слоя ЦСП —  $25 \times 25$ ,  $20 \times 20$  и  $15 \times 15$  мм; для наружных слоев ЦСП —  $10 \times 10$ ;  $5 \times 5$  и  $2 \times 2$  мм.

Доизмельчение стружки наружных слоев производят на молотковых дробилках типа ДМ-7. Далее стружку направляют на классификацию. Готовый классифицированный продукт помещают на хранение в вертикальные бункеры для обеспечения бесперебойной работы автоматизированных цехов.

Современное оборудование позволяет одновременно изготавливать и фракционировать стружку без разделения по слоям, а ее непосредственное разделение осуществляется в самой формирующей машине.

Качество получаемой продукции всецело зависит от точного дозирования исходных компонентов и получения цементно-стружечной смеси заданного состава. На заводах по производству ЦСП возможно весовое и объемное дозирование компонентов.

Портландцемент поступает в цех со склада цемента пневмотранспортом.

Приготовление растворов химических добавок осуществляется в специальных емкостях с пропеллерными мешалками, в которые их загружают, заливают водой и перемешивают до заданной плотности раствора или разбавляют в той же емкости до заданной плотности, если находятся в виде раствора.

Современные предприятия по изготовлению цементно-стружечных плит оборудуют смесительными агрегатами периодического действия, позволяющими отдельно производить смеси для внешнего и внутреннего слоев ЦСП. Однако, когда послойное распределение смеси осуществляется в формирующей машине, перемешивание компонентов происходит в одной установке.

Приготовление цементно-стружечной смеси производится в смесителях принудительного действия в определенной последовательности. Первоначально в смеситель подается стружка, далее отходы от обрезки, вода затворения, раствор сульфата алюминия, за ним раствор жидкого стекла и портландцемент. Длительность перемешивания цементно-стружечной смеси не должна быть более 10 мин. Влажность полученной смеси должна находиться в пределах 40–43 %. Повышение влажности свыше указанных значений ухудшает качество смеси и способствует загрязнению формирующей машины. Понижение влажности формовочной смеси ниже указанной величины ухудшает условия ее нормального твердения и оказывает негативное влияние на качество полученных изделий. Готовая смесь после окончания перемешивания попадает в дозирующий винтовой бункер, а далее поступает посредством ленточного конвейера в формирующую машину, задача которой сформировать ковер с необходимыми качественными характеристиками из готовой смеси на специальных поддонах.

Из формовочной машины смесь поступает на специальные стальные, непрерывно поступающие, смазанные поддоны. Они заполняются трехслойным ковром из цементно-стружечной смеси, которая представляет собой трехслойный ковер. При формировании цементно-стружечной плиты ее наружные слои формируют методом воздушной сепарации, а распределение внутреннего слоя осуществляют через вращающийся валик с дисковыми ножами.

Поддоны с полученным ковром подают к крану-штабелеру, который складывает их в штабель и перемещает для прессования под пресс. Давление прессования в зависимости от плотности плит составляет 2,8–3,2 МПа.

Штабель из прессованных плит поступает в камеру тепловой обработки, где изделия приобретают начальную прочность, необходимую для распалубки. Температура тепловой обработки зависит от свойств цемента, породы применяемой древесины, вида химических добавок и других факторов и находится в диапазоне 50–80 °С. При этом влажность окружающего воздуха должна быть не менее 50–60 % для предотвращения их высыхания. Продолжительность тепловой обработки с учетом технологических особенностей смеси составляет от 6 до 8 ч.

Из камеры твердения после распрессовки пакеты поступают к участку расформовки, где происходит отделение металлических поддонов от полученной цементно-стружечной плиты. Пакеты с плитой укладывают на промежуточном складе, откуда после вылежки не менее 14 дней транспортируют на участок первичной обрезки.

Окромленную плиту поштучно подают в камеру сушки, где в вертикальном положении выдерживают в течение нескольких часов при определенной влажности и температуре, различающейся по зонам камеры сушки.

Вышедшая из сушильной камеры плита окончательно окромляется и штабелируется в пакеты. Общая производительность цикла производства плиты составляет 16–18 дней. Производство плиты ЦСП происходит с в автоматическом режиме.

На рис. 5.2 и 5.3 представлена современная технологическая линия по производству ЦСП с использованием инновационного оборудования фирмы Eltomation, позволяющая не только максимально использовать отходы древесины, но и применить древесину как хвойных и лиственных пород.

Неокоренная древесина обрабатывается на специальном окорочном станке. Специально разработана линия для окорки древесины и дальнейшей переработки отходов в топливные брикеты, которая включает бункер хранения, ее сушку, пресс для брикетирования.

После выдержки древесины на складе сырья готовят стружку, которая повторно измельчается и сортируется. Измельчение грубой стружки производится в дезинтеграторе, после чего посредством дозирования по массе стружка направляется в смеситель. Предварительно приготовленные химические добавки и вяжущее загружаются в смесительную установку и подвергают перемешиванию. Приготовленную цементно-стружечную массу подают в формовочную машину. Металлические поддоны, проходящие по конвейеру под машиной, равномерно и непрерывно заполняются смесью из формовочной машины. Далее ковер разделяют по длине на пакеты при помощи электронного устройства контроля плотности и равномерности укладываемого настила. Пакеты, не соответствующие требованиям по плотности, сбрасывают на специальную систему конвейеров, которые отправляют смесь обратно в формующую машину, производящую укладку среднего слоя плиты.

Пакеты с металлическими поддонами укладывают на силовые тележки в штабель, направляемый далее под гидравлический пресс для прессования и придания плитам необходимой толщины. По достижении плитой номинальной толщины силовая тележка замыкается с помощью специального устройства и направляется в термокамеру для тепловой обработки. После термообработки плиты, уложенные в силовых тележках, выходят из камеры и распрессовываются в прессе.

После выдержки в тепловой камере и распрессовки плиты обрезают и они поступают в сушильную камеру. При сушке изделия устанавливают вертикально, при этом их остаточная влажность составляет  $9 \pm 3$  %. Раскройку готовых плит до изделий требуемых размеров произ-

водят на обрезном станке. Образующиеся при разделке отходы поступают по конвейеру в дробилку для доизмельчения, далее их разделяют по фракциям и загружают в смеситель.

Готовая продукцию хранят и складировуют в сухих и закрытых помещениях в штабеле высотой 4500 мм в пачках, уложенных горизонтально на поддонах или деревянных паллетах.

Пачки загружают в транспортные средства с помощью автопогрузчиков и также разделяют прокладками. Плиты в пачке фиксируют в поперечном направлении крепежными лентами, что полностью гарантирует их сохранность при обычных условиях транспортировки автомобильным транспортом.

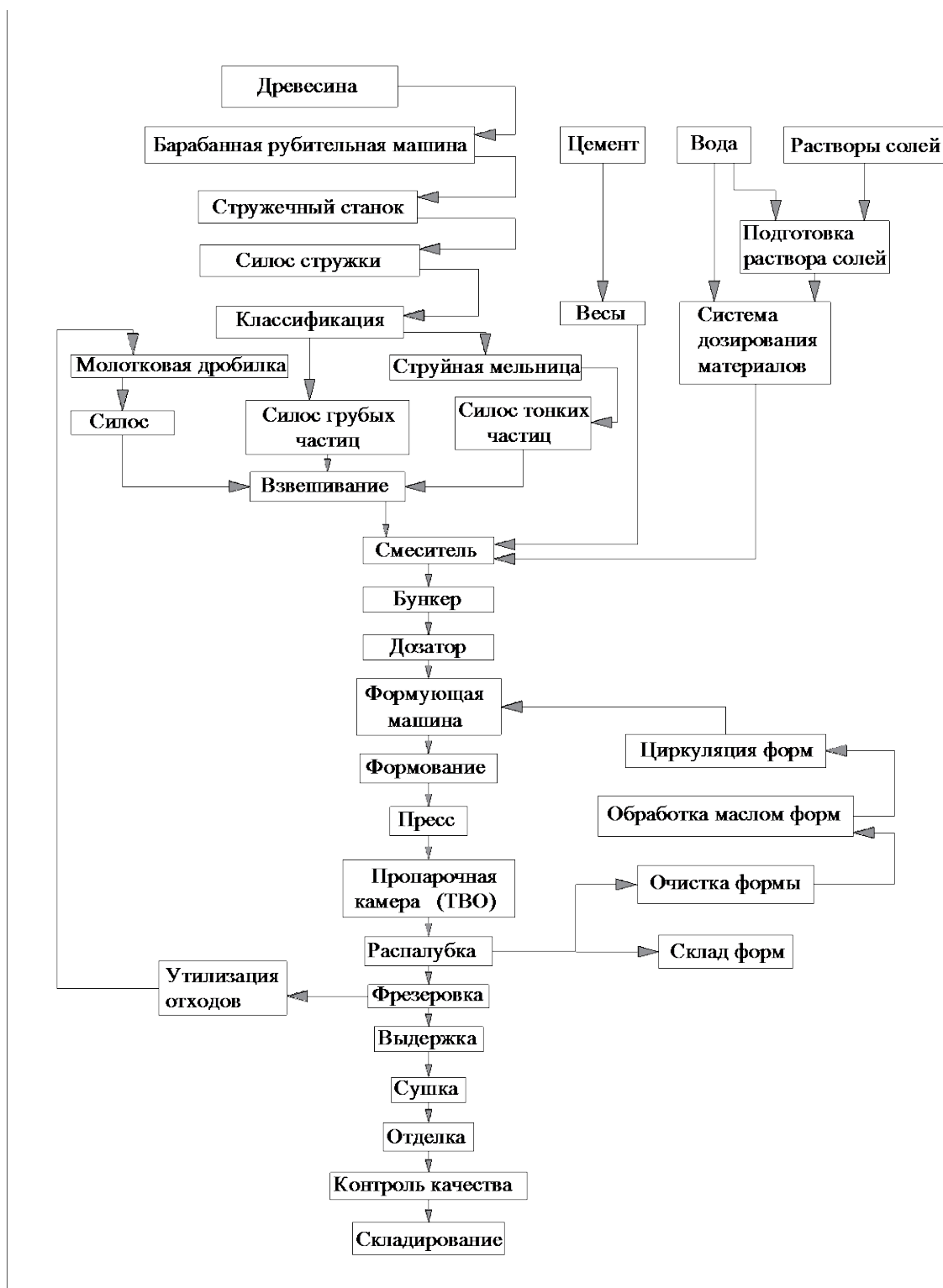


Рис. 5.2. Технологическая схема производства ЦСП на оборудовании фирмы Eltomation

**Области применения ЦСП.** Области применения ЦСП регламентированы стандартом. Цементно-стружечные плиты, являясь трудногорючими, трудновоспламеняемыми строительными материалами, используются в качестве строительных изделий: подоконных досок, облицовок, ограждений, несущих конструктивных элементов, экранов, обшивок сэндвич-панелей с внутренним слоем из пенопласта. Высокая плотность, твердость и влагостойкость дают возможность применять их для стен, пола и потолков в помещениях с любой влажностью, в том числе и в ванных комнатах.

Цементно-стружечные плиты легки в обработке, фрезеровке, сверлении и шлифовании. ЦСП применяются в панельном деревянном домостроении, что позволяет значительно снизить потребление высокосортной древесины и изделий на ее основе и повышает производительность труда.

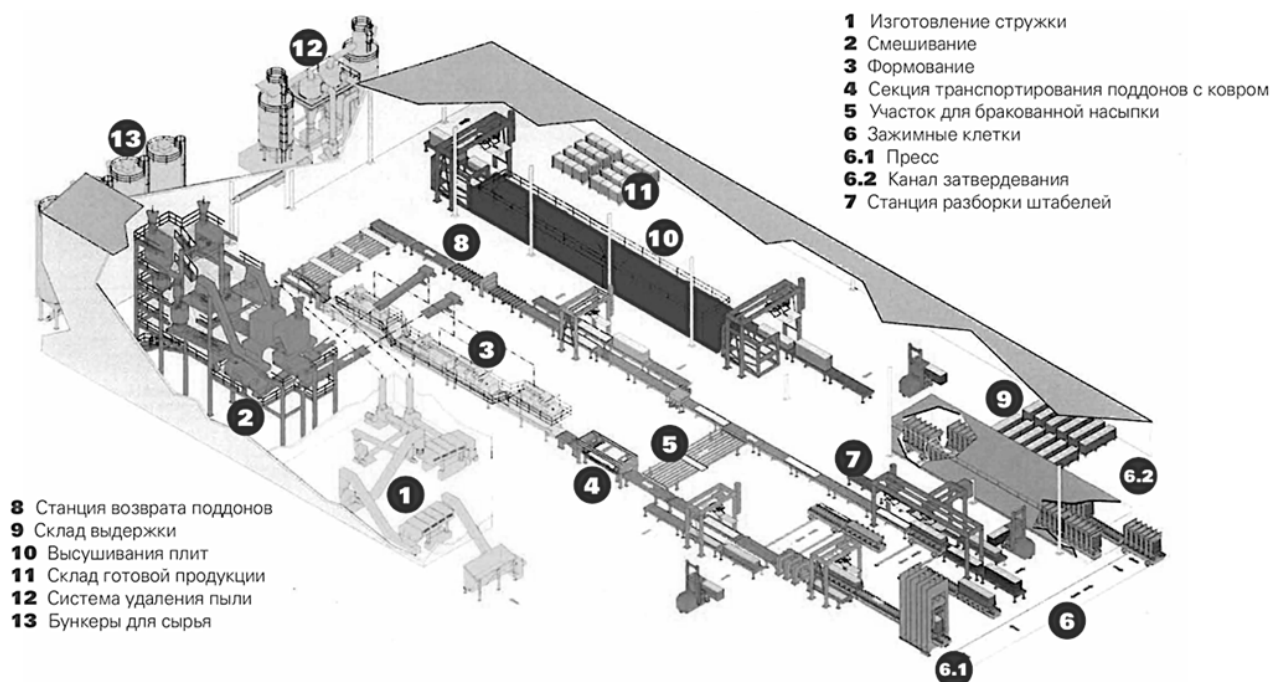


Рис. 5.3. Внешний вид технологической линии по производству ЦСП на оборудовании фирмы Eltomation

## 5.6. Гипсоволокнистые листы

Приоритет создания технологии производства гипсоволокнистых изделий принадлежит Советскому Союзу. Разработкой занимались ряд научно-исследовательских и проектных организаций. Впервые промышленное производство гипсоволокнистых изделий было организовано в Москве и Ленинграде.

**Гипсоволокнистые листы (ГВЛ)** являются листовым отделочным материалом, изготовленным методом полусухого прессования из формовочной массы, состоящей из гипсового вяжущего и армирующих бумажных волокон, равномерно распределенных по всей толщине листа.

ГВЛ применяются при устройстве подвесных потолков, межкомнатных перегородок, для внутренней облицовки стен, оснований под полы, используются для облицовки конструкций с целью повышения их предела огнестойкости.

В зависимости от свойств листы подразделяются на обычные (ГВЛ) и влагостойкие (ГВЛВ). Листы ГВЛ применяют в зданиях и помещениях с сухим и нормальным влажностными режимами, ГВЛВ — в зданиях и помещениях с сухим, нормальным и влажным режимами в соответствии с действующими нормами по строительной теплотехнике. При применении ГВЛВ в зданиях и помещениях с влажным режимом следует предусматривать вытяжную вентиляцию, обеспечивающую нормативный воздухообмен. Поскольку в состав ГВЛ

входит в гипс (80–83 %), химически связанная вода которого способствует эффективному обеспечению огнестойкости, обеспечиваются высокие пожарно-технические показатели конструкций.

Гипсоволокнистые листы относятся:

- к слабогорючим материалам с группой по горючести Г1 по ГОСТ 30244–94 «Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть»;
- трудновоспламеняемым материалам с группой воспламеняемости В1 по ГОСТ 30402–96 «Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость»;
- материалам с малой дымообразующей способностью Д1 по ГОСТ 12.1.044–89 «Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения»;
- малоопасным материалам по токсичности Т1 по ГОСТ 12.1.044–89.

Геометрические размеры листов в соответствии с ГОСТ Р 51829–2001 «Листы гипсоволокнистые. Технические условия», мм:

- длина — 1500; 2000; 2700; 3000;
- ширина — 500; 1000; 1200;
- толщина — 10,0; 12,5; 15,0; 18,0; 20,0.

Твердость лицевой поверхности листов должна быть не менее 20 МПа. Поверхностное водопоглощение листов ГВЛВ не должно быть более 1,0 кг/м<sup>2</sup>.

В качестве сырьевых материалов для производства ГВЛ используют как природный, так и химический гипс (гипсовое вяжущее), макулатуру.

Для придания листам противопыльных и водоотталкивающих свойств применяется поверхностная обработка растворами латекса или силиконовой жидкостью.

Для получения водостойких ГВЛ и ГВП их необходимо производить из водостойкого модифицированного вяжущего.

Основные принципы, заложенные в основу производства гипсоволокнистых изделий, сохраняются и в современных технологиях. Они заключаются в подготовке (измельчении и превращении в тонкое волокно) макулатуры, тщательном смешении волокна с гипсовым вяжущим для получения формовочной массы, формовании, сушке в специальных сушилах и окончательной отделке изделий.

Однако в способах выполнения отдельных операций и применяемом оборудовании имеются существенные различия. Особенно это касается способов расщепления макулатуры на волокна и формования изделий.

Существуют несколько способов подготовки сырьевой смеси и формования гипсоволокнистых листов и плит. Основные из них детально рассмотрены в технической литературе.

Практическое применение нашли разработанные фирмой Siempelkamp (ФРГ) установки и технология, предусматривающие сухую распушку макулатуры при изготовлении гипсоволокнистых листов, либо волокна из древесины.

Технологический процесс производства гипсоволокнистых листов заключается в следующем (рис. 5.4). Со склада предприятия грейферным захватом 1 макулатуру подают к дозирующему ленточному конвейеру 2. Перерабатываемую макулатуру измельчают на мелкие куски размером 2 × 2 см в дробилке 3 и передают с помощью пневматической установки 7 в бункер 4 предварительного хранения бумажных обрезков.

Система ленточных конвейеров и регулируемые перебросные ленты посредством загрузочного шнека 5 и лотков перераспределяют бумажные обрезки в три мельницы 6 для измельчения бумаги. Измельченная бумажная смесь просеивается сквозь сито с величиной ячеек 1,5–2 мм, отбирается пневматической установкой и, пройдя через циклонный сепаратор 8, отправляется на ленточный питатель, оснащенный весовым дозирующим устройством 9 для взвешивания. На ленточные весы также попадает и гипсовая смесь, которая после взвешивания поступает вместе с бумажной массой в смеситель. Все компоненты будущего строительного материала интенсивно перемешивают, в итоге получают гипсоволокнистая смесь, распределяемую на настилочной ленте в виде непрерывной ковровой дорожки.

Из бункера 10 гипсовое вяжущее с помощью разгрузочного шнека 11 и весового устройства 12, попадает в смеситель. Одновременно из бункера 13 посредством загрузочного шнека 14 и весов 15 поступает гипсовая пыль. В смесителе 16 гипсовое вяжущее и гипсовая пыль смешиваются и поступают по винтовому конвейеру 17 к ленточному питателю, оснащеному весовым дозирующим устройством 9. Измельченная макулатура подается через дозирующее устройство макулатуры 9 в смеситель непрерывного действия 18, где смесь подвергается интенсивному перемешиванию, а далее последовательно проходит винтовой конвейер 19, качающийся конвейер 20 и поступает в формовочную машину 21. Гипсовая смесь равномерно распределяется по ленте в виде настила (ковра) 22 при помощи выравнивающего устройства в виде вала с шипами 23 с одновременным удалением ее излишков. Далее отформованный ковер взвешивается весами 24, его боковые кромки обрезаются с помощью специального устройства 25 с возможностью регулирования высоты настила выравнивающим валком 29. Излишки отработанной смеси поступают в винтовой конвейер 27, и по элеватору 28 смесь повторно подается в формовочную машину 21 винтовым конвейером 19. Далее ковер из гипсоволокнистой массы уплотняется на третьем валке на специальной водопроницаемой сетчатой ленте и обильно увлажняется водой, поступающей из форсунки 30. После увлажнения 32 материал прессуется с помощью гидравлического пресса 31 при давлении 5 МПа и продолжительности прессования, равной 28 с. Для изготовления гипсоволокнистых листов требуется провести несколько циклов прессования.

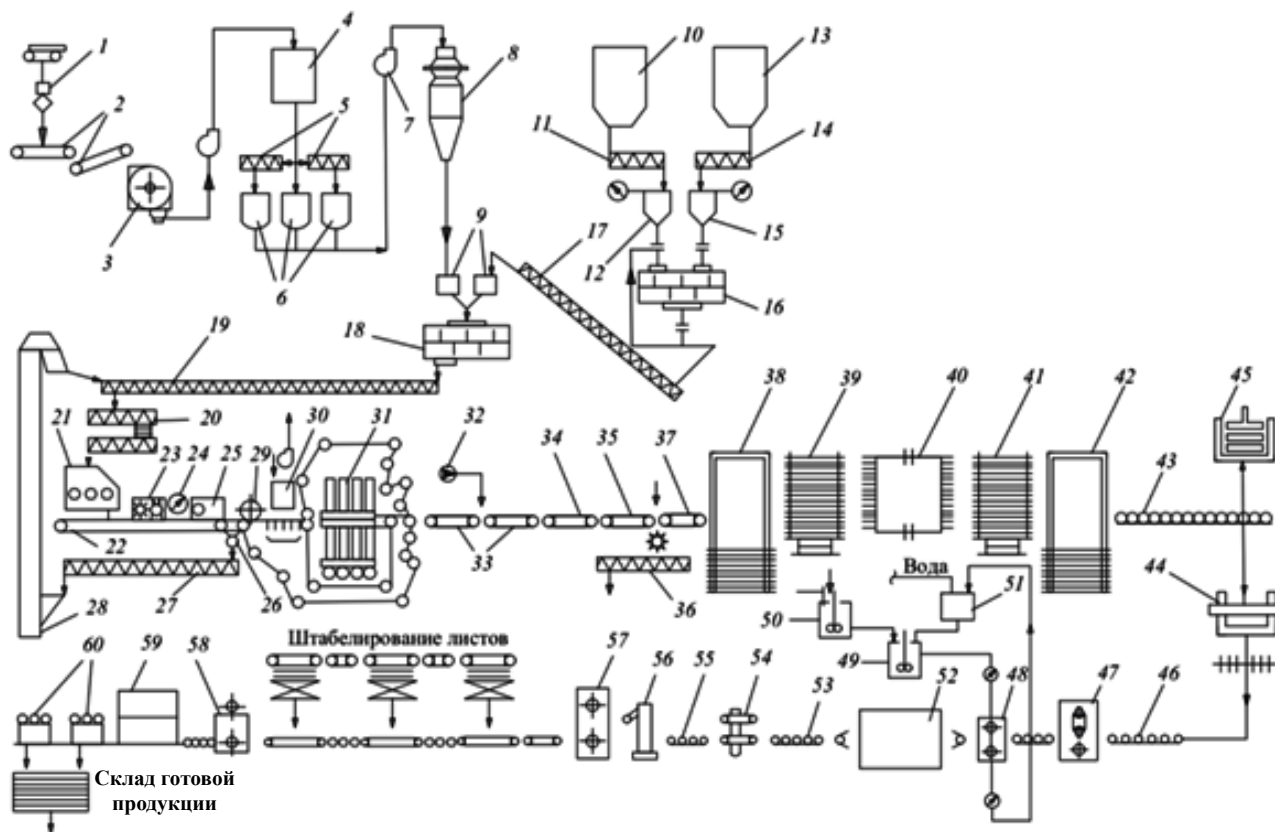


Рис. 5.4. Технологическая схема производства гипсоволокнистых плит

После гидравлического пресса ковер из гипсоволокнистой массы длиной 37 м разрезается сильной водяной струей 32 на двойную номинальную длину и подается на ленточный конвейер 33—35 и 37, проходя по которому он твердеет. Изделия по ленточным конвейерам 35 и 37 загружают в этажерку 38, а далее после заполнения всех ярусов этажерки изделия поступают в накопитель 39. Накопитель отправляется для высыхания в сушильную камеру 40, в котором сушка производится газовой воздушной смесью. После сушки изделия поступают из разгрузочного накопителя 41 на разгрузочную этажерку 42, а далее на линию 43 окончательного раскроя гипсоволокнистых листов пилами 44 — одной пилой поперечного среза и двумя кромкообраз-



ными. Направляемые по роликам 46, 53 и 55, изделия шлифуются с обеих сторон абразивным инструментом 47, грунтуются, обрабатываются силиконовым маслом 48 и опять высушиваются в сушилке 52. На последнем этапе производства на листах обрезают 54 и фрезеруют кромки 56, складывают в штабеля 57 и через промежуточные стадии 58 и 59 отправляют на склад 60.

## 5.7. Гипсостружечные плиты

Современной альтернативой ГВЛ является гипсостружечная плита (ГСП). **Гипсостружечные плиты** (gypsum-bonded particle board) на 85 % состоят из гипса и на 15 % из наполнителя органического происхождения, который при введении в гипсовое тесто способствует приданию плитам необходимых прочностных свойств. Исходными материалами для производства гипсостружечных плит являются гипс, древесная стружка из березы и сосны, вода и замедлители схватывания.

ГСП применяются в качестве строительных элементов для устройства стеновых конструкций, могут выполнять роль облицовочного отделочного материала для внутренней отделки стен, обладают огнестойкостью (класс В, с поверхностью невоспламеняемой и не распространяющей огонь), влагостойки, отличаются хорошими звукоизоляционными свойствами, легки в обработке при сверлении и пилении, легко поддаются окрашиванию и облицовке различными материалами. Применяются ГСП только во внутренних помещениях.

В России гипсостружечные плиты появились сравнительно недавно. Первые ГСП, состоящие из гипсового вяжущего и древесного наполнителя (стружки) были получены в Германии. В 1982 г. гипсостружечные плиты были впервые представлены на одной из конференций. В 1984 г. финская компания Sasmox году приобрела право на изготовление гипсостружечных плит в Финляндии, а в 1985 г. впервые в мире было запущено производство ГСП. В европейских странах гипсостружечные плиты являются довольно распространенным строительным материалом. Только в 2010 г. гипсостружечные плиты стали выпускать на Пешеланском гипсовом заводе.

Основным сырьем для производства гипсостружечных плит являются окоренная древесина и гипс. Производство гипсостружечных плит осуществляется полусухим способом формования на конвейере при водогипсовом отношении 0,25–0,35 и отношении древесины к гипсовому вяжущему 0,2–0,3.

Получение древесной стружки осуществляется в две стадии. Первоначально на специальном рубительном станке готовится древесная щепка, из которой далее в стружечном станке она превращается в специальную гибкую стружку длиной 10–15 мм и толщиной 0,2–0,3 мм. Полученная стружка подвергается классификации на ситах, после чего оставшиеся грубые фракции отправляются на измельчение в специальную мельницу. Измельченная стружка далее поступает в сушильный барабан для получения продукта с влажностью до 80 %.

Приготовление гипсостружечной смеси производится в специальном смесителе, в который поступают дозированные по весу материалы. Количество воды затворения определяется в автоматическом режиме и зависит от влажности древесной стружки, определяемой специальным устройством. Возможно применение химических добавок, ускоряющих или замедляющих схватывание гипсостружечной смеси.

Приготовленная гипсостружечная смесь подается в непрерывном режиме при помощи четырех насыпных головок на транспортные поддоны, предварительно обработанные разделительным средством, которые представляют собой бесконечный движущийся конвейер. На участке, следующем за формовочной машиной, непрерывный ковер на поддонах разделяется на отдельные плиты с помощью транспортера быстрого отвода поддонов и перемещается к загрузочной установке. В случае придания плитам рельефной поверхности, на них сверху помещают форму с необходимым профилем. Специальное контрольное приспособление дает возможность прессовать только те плиты, качество которых полностью соответствует предъявляемым требованиям. Готовые поддоны укладываются в пакет с помощью штабелера. Далее пакет помещают под пресс и фиксируют с помощью специального зажимного каркаса. Зафиксированные зажимным каркасом пакеты направляют на выдержку специальную

площадку для окончания схватывания гипсового вяжущего и набора прочности в течение нескольких часов. После этого приступают к распалубливанию изделий. Распалубленные плиты отправляют в сушильную камеру, а пустые поддоны возвращают на линию формования.

Перед отправкой потребителю изделия поступают в сушильную камеру проходного типа для сушки при температуре 40 °С до остаточной влажности  $2 \pm 0,5$  %. Высушенные гипсостружечные плиты подаются к обрезному станку для выравнивания кромок плиты. Находящийся сразу за обрезной пилой штабелер, складывает плиты в пакет, далее перемещаемый внутрицеховым транспортом перемещается к шлифовальной линии на склад готовой продукции или к установке для раскроя гипсовых плит.

Гипсостружечные плиты выпускают толщиной 10 и 12 мм, их плотность равна  $1250 \text{ кг/м}^3$ , прочность при изгибе — не менее 8 МПа при толщине плиты 10 мм и не менее 7,0 МПа при толщине 12 мм. Они могут быть обычными и влагостойкими.

Помимо пожаробезопасности ГСП имеют отличные тепло- и звукоизоляционные свойства, не чувствительны к воздействию плесени, грибков и бактерий, не повреждаются насекомыми и грызунами. Структура плит, армированных древесными волокнами, делает их износостойкими и ударопрочными, поэтому при монтаже и эксплуатации механические повреждения сводятся к минимуму.

## 5.8. Системы КНАУФ

**КНАУФ-листы.** Компания КНАУФ выпускает гипсокартон или гипсовые строительные плиты по ГОСТ 32614–2013 (EN 520:2009) «Плиты гипсовые строительные. Технические условия» под собственным торговым названием «КНАУФ-лист».

КНАУФ-листы выпускают следующих типов:

- А — обычный;
- Н2 — влагостойкий;
- DF — заданной плотности с повышенной стойкостью к воздействию открытого пламени;
- DFН2 — влагостойкий с заданной плотности с повышенной стойкостью воздействию открытого пламени.

КНАУФ-листы применяют при устройстве легких каркасно-обширных конструкций перегородок, облицовок и подвесных потолков. Тип листов выбирают исходя из влажностного режима помещения по СП 50.13330.2012 «Свод правил. Тепловая защита зданий». Кроме гипсокартона КНАУФ выпускает и другие листовые материалы на основе гипса.

Каркас перегородок, облицовок и подвесных потолков может выполняться из дерева или металлического оцинкованного профиля, но применение профиля, как показывает практика, более технологично.

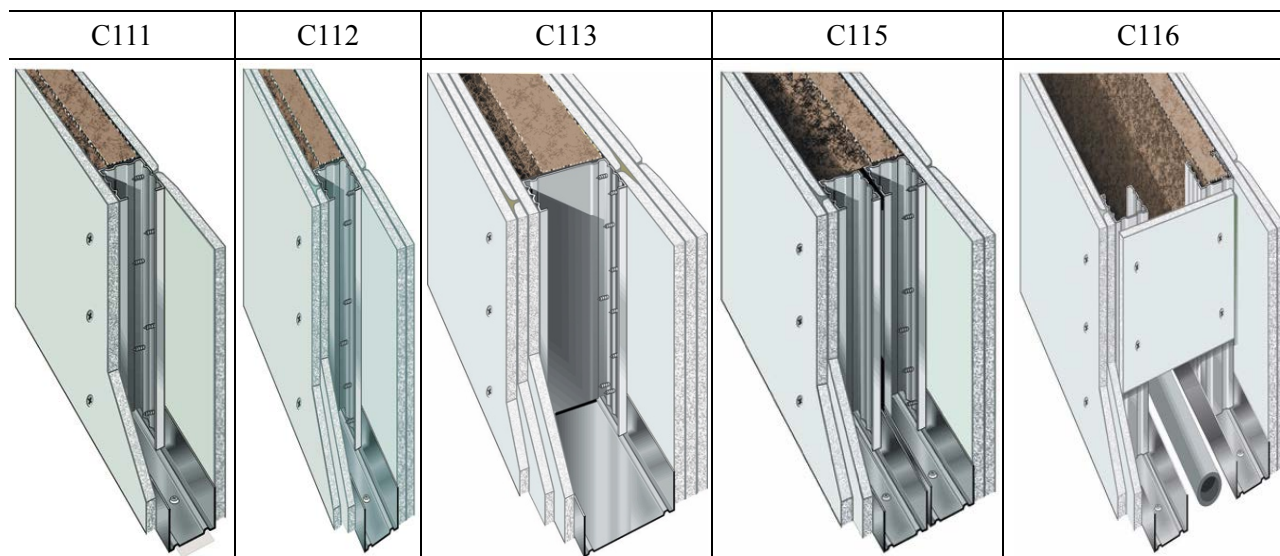
Особенностью КНАУФ является то, что компания предлагает потребителям комплектные системы. Понятие комплектной системы включает в себя возможность приобретения у производителя всех необходимых компонентов систем, а также варианты технических решений и техническую поддержку. Комплектность важна не только с точки зрения удобства для потребителя, но и сточки зрения качества готовой конструкции.

**Перегородки КНАУФ.** Перегородки КНАУФ применяют там, где требуются качественные легкие конструкции с ровной поверхностью, пригодной к любым видам отделки, с высокими параметрами по звукоизоляции, огнестойкости и прочности. Конструкции перегородок могут включать одинарный или двойной каркас. Для формирования каркаса используют направляющий и стоечный профили, изготовленные из оцинкованной стали толщиной 0,6 мм. Профиль может быть шириной 50 мм, 75 мм или 100 мм. Обшивка выполняется как в один слой, так и в несколько слоев. Тип каркаса и количество слоев КНАУФ-листов определяют характеристики конструкций и их назначение. Например, перегородки С111 и С112 относятся к стандартным конструкциям. Перегородка С113 обладает наилучшими характеристиками по пределу огнестойкости (не менее 240 мин). Перегородка С115 является лучшей по звукоизоляции, С116 имеет пространство между каркасами, что позволяет укладывать внутри инженерные сети.

В табл. 5.8 представлены основные конструкции перегородок с обшивкой из КНАУФ-листов.

Таблица 5.8

Перегородки с обшивкой КНАУФ-листов

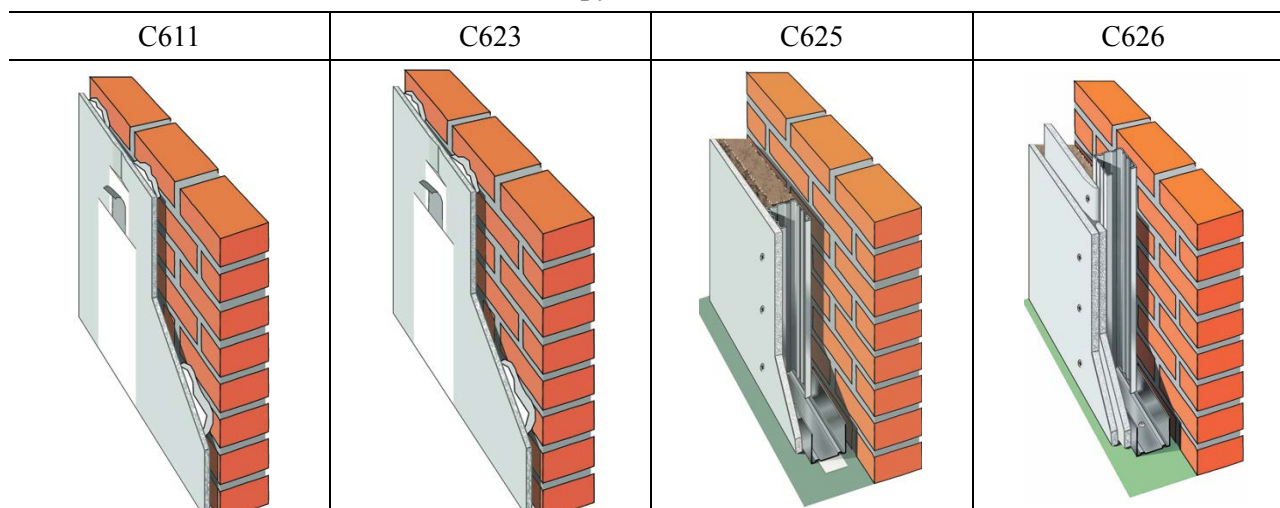


**Облицовки КНАУФ.** Облицовки КНАУФ являются элементом сухого строительства, дающего возможность быстро и качественно выровнять поверхность стен, колонн, пилястр и т.п. Облицовки бывают бескаркасные (С611), когда листы приклеиваются непосредственно к стене помещения с помощью специальных смесей, и на металлическом каркасе. На металлическом каркасе обшивка может выполняться в один или два слоя. В случае с конструкцией С623 для формирования каркаса используются потолочный и направляющий потолочный профили. Для каркасов облицовок С625 и С626 применяется такой же профиль, как и в случае перегородок.

В табл. 5.9 показаны основные конструкции облицовок.

Таблица 5.9

Основные конструкции облицовок КНАУФ

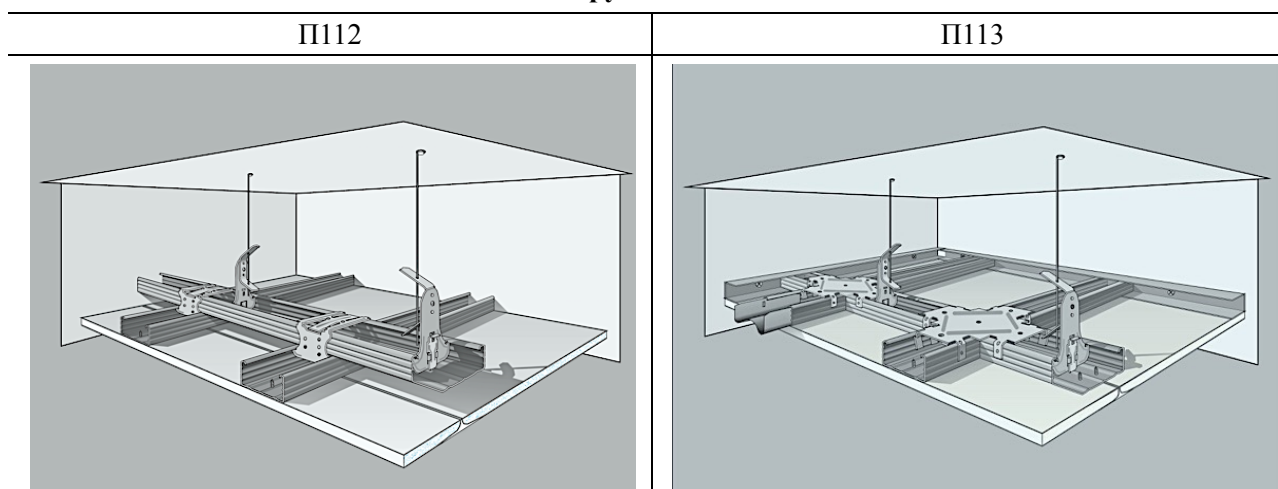


**Подвесные потолки КНАУФ.** Подвесные потолки КНАУФ — это оптимальное решение конструктивно-планировочных задач, проблем акустики, устранения неровностей перекрытия и скрытого размещения инженерных коммуникаций. Каркас подвесных потолков КНАУФ формируется из потолочного профиля, который с помощью подвесов закрепляется к перекрытию и затем к каркасу с помощью шурупов.

В табл. 5.10 представлены основные конструкции потолков.

Таблица 5.10

Основные конструкции потолков КНАУФ



Различие потолков заключается в типе каркаса. У потолка П112 каркас двухуровневый и опирается только на подвесы, закрепленные к перекрытию. Потолок П113 имеет одноуровневый каркас, который кроме подвесов, опирается на профиль направляющий потолочный, закрепленный по периметру к стене помещения.

**Условия монтажа перегородок, облицовок и подвесных потолков.** Монтаж перегородок, облицовок и подвесных потолков следует выполнять в период отделочных работ (в зимнее время при подключенном отоплении), до устройства чистых полов, когда все мокрые процессы в помещении закончены и выполнена разводка электротехнических и сантехнических систем, в условиях сухого и нормального влажностного режима согласно СП 50.13330.2012. При этом температура в помещении не должна быть ниже 10 °С.

## 5.9. Строительные композиты на основе магнезиальных вяжущих и древесных наполнителей

**Композиционные материалы на основе магнезиальных вяжущих** нашли широкое применение в строительстве благодаря своим уникальным свойствам и высокой энергоэффективности, что связано с более низкой температурой получения по сравнению с портландцементом. Строительные композиты на основе магнезиальных вяжущих являются экологически чистыми материалами, гигиеничны, противостоят гниению, обладают фунгицидными и бактерицидными свойствами, незначительным пылеотделением, негорючи и температуроустойчивы до 400 °С, обладают защитными свойствами от действия радиации, имеют повышенные показатели прочности на растяжение при изгибе, ударной стойкости и высокой прочности сцепления с различными материалами, в том числе органическими, проявляют химическую стойкость по отношению к агрессивным растворам щелочей, солей и других минерализованных вод. Имеют высокую стойкость к истиранию, не уступающую таким материалам, как порфир, базальт и гранит.

Основные свойства строительных материалов на основе магнезиальных вяжущих изменяются в широких пределах и зависят от вида применяемого заполнителя, наполнителя и добавок.

На основе магнезиальных вяжущих производят следующие виды строительных материалов теплоизоляционного и декоративного назначения: стеновые перегородки, наливные полы, фибролит, ксилолит, пеномагнезит, подоконные доски, лестничные ступени, абразивные круги и т.д.

Из строительных материалов на основе магнезиальных вяжущих производят:

- высокопрочные полы и разного рода покрытия, изготовленные из тяжелых бетонов, жернова, точильные камни, ступени для лестниц, плитки для пола, кровельные плиты, искусственный мрамор;

- штукатурные, шпатлевочные, цементно-песчаные составы для малых скульптурных форм, минеральные краски, материалы специального назначения, включающие составы для огнезащиты и защиты от биологической коррозии строительных сооружений, изделия для огнеупорной промышленности, абразивы;
- прессованные плитки с использованием в качестве заполнителя древесной мелочи, которые могут заменить паркет;
- стекломгнезитовые плиты для внутренней и наружной отделки, представляющие собой ксилолитовую плиту, снизу и сверху армированную стеклотканью. Плиты хорошо поддаются окраске, их отделяют минеральной крошкой и используют для оформления фасадов и внутренней отделки. Такие плиты в 2008 г. начали выпускать в Екатеринбурге.

*Ксилолит* представляет собой разновидность легкого бетона и является композиционным материалом на основе древесных опилок, магниезиального вяжущего, затворенного раствором солей. Для улучшения эксплуатационных свойств в его состав вводятся тонкодисперсные минеральные наполнители в небольших количествах (мраморная мука, тальк, трепел, кварцевый песок) и красители и щелочестойкие пигменты. В табл. 5.11 представлены основные свойства ксилолита.

Таблица 5.11

**Основные свойства ксилолита**

Основные свойства	Прессованный ксилолит	Монолитный ксилолит
Теплопроводность, Вт/(м · °С)	0,24–0,26	0,08–0,21
Водопоглощение в течение 12 ч, %	2,1	–
Водопоглощение в течение 9 сут, %	3,8	–
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	1550	1000–1200
Прочность при сжатии, МПа	85,4	20–35
Прочность при растяжении, МПа	25,4	3–5
Прочность при изгибе, МПа	48,9	–

Ксилолит, полученный на основе каустического магнезита, прочнее ксилолита на основе каустического доломита. Для изготовления ксилолита применяются опилки с влажностью до 20 %, размером частиц не более 2 мм для верхнего слоя покрытия и 10 мм для нижнего слоя покрытия. В табл. 5.12 приведены рекомендуемые составы ксилолитовых смесей для устройства полов.

Таблица 5.12

**Примерные составы ксилолитовых смесей для устройства полов**

Виды покрытия пола и интенсивность движения	Состав смеси объему		Концентрация раствора MgCl <sub>2</sub> , г/см <sup>3</sup>
	эластичное покрытие магнезит – опилки	жесткое покрытие магнезит – опилки – песок	
Однослойное и двухслойное с верхним слоем из ксилолита:			
– с небольшим движением	1 : 2	1 : 1,4 : 0,6	1,18
– с интенсивным движением	1 : 1,5	1 : 1 : 0,5	1,2
– в особо изнашиваемых (лестничные площадки, проходы)	Не применяется	1 : 0,7 : 0,3	1,24

Основной технологической операцией по производству прессованных ксилолитовых изделий является приготовление формовочной массы, которое осуществляется в следующей последовательности. В бетоносмесителе принудительного действия первоначально готовится

сухая смесь на основе каустического магнезита, пигмента и опилок, которая подвергается совместному перемешиванию в течение 30–40 с. Далее в полученную сухую смесь вводится затворитель и смесь тщательно перемешивается еще 60–90 с. При этом общая продолжительность цикла приготовления ксилолитовой смеси с операциями загрузки, перемешивания и выгрузки составляет 4 мин.

Приготовленная смесь выгружается в объемный дозатор, откуда выдается в металлические разъемные формы. Уплотнение ксилолитовой смеси при формировании плит для пола производится на гидравлических прессах. После окончания поверхность отформованных изделий необходимо укрыть до приобретения первоначальной прочности. Применяются методы тепловой обработки в специальных камерах для ускорения процесса твердения и сокращения цикла формирования ксилолитовых плит. Температура обработки составляет 30–40 °С.

После остывания производится распалубка изделий и обработка их краев на фрезерных станках со специальными фрезами. Далее изделия подвергаются выщелачиванию в течение 12–24 ч для удаления избыточных солей магния путем погружения в ванны с подогретой водой. После этого изделия сушатся в сушильных камерах, работающих по схеме многократного насыщения, при температуре не более 60–70 °С в течение 12–24 ч.

Заключительным этапом в производстве ксилолитовых плит является их фрезеровка, шлифовка, полировка воском и маслом для придания изделиям внешнего вида и точных размеров.

Далее изделия поступают на закрытый склад готовой продукции, где хранятся на расстоянии 20–25 см от пола для защиты сырости.

При устройстве покрытий необходимо применять оцинкованные крепежные детали, защищенные антикоррозионным покрытием.

## ГЛАВА 6. ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 6.1. Классификация древесно-полимерных композиционных материалов

Древесно-полимерные композиционные материалы (композиты) (ДПК) по типу составных элементов подразделяют:

- на *крупноструктурные* — массивная клееная древесина, слоистая клееная древесина;
- *мелкоструктурные* — древесностружечные плиты, древесноволокнистые плиты средней плотности (МДФ — от англ. *Medium Density Fibreboard*, *MDF* и т.п.);
- *комбинированные* — могут включать крупноструктурные и мелкоструктурные элементы;
- *гибридные* — включают древесные и недревесные элементы и частицы (пленка, фольга, стекловолокно, базальтовое волокно, минеральные порошки и т.д.).

Крупноструктурные ДПК обладают выраженными анизотропными свойствами и достигают в размере нескольких метров. В мелкоструктурных ДПК размеры элементарных частиц меньше этих величин, вплоть до нанометров. Мелкоструктурные ДПК могут иметь как упорядоченную, так и хаотичную структуру. В последнем случае их свойства более изотропны.

В зависимости от конечной геометрической формы изделий древесно-полимерные композиты изготавливаются в виде листов, профильных погонажных изделий, плит, досок, брусьев и брусьев, а также изделий сложной формы.

В качестве связующего (матрицы) в древесно-полимерных материалах могут применяться природные связующие, синтетические термореактивные и термопластичные смолы и комбинированные связующие.

ДПК образуют группы легких и тяжелых пластиков, применение которых определяется их плотностью, количеством связующего и давлением прессования при производстве.

### 6.2. Сырьевые материалы

До недавнего времени ДПК производили в основном из древесины и полимера. В некоторые из них добавляли небольшое количество простейших гидрофобизаторов. В настоящее время внимание к применению разнообразных аддитивов-модификаторов быстро расширяется. Этому способствует количество проводимых научных исследований, но главным образом — расширение областей использования ДПК и успехи химической промышленности.

В качестве связующих для производства ДПК применяются синтетические и природные вещества. В зависимости от способа получения и способности сохранять свою структуру после нагревания синтетические связующие разделяют на поликонденсационные и полимеризационные, термореактивные и термопластичные. Термореактивные смолы при нагревании необратимо переходят в нерастворимое твердое состояние. Термопластичные смолы способны многократно размягчаться при нагревании, а при охлаждении переходить в твердое состояние.

В составе связующих, как правило, присутствуют различные технологические добавки: катализаторы отверждения, стабилизаторы (или замедлители), растворители, пластификаторы, пенообразователи и др. Отвердители или катализаторы отверждения способствуют образованию трехмерной структуры, повышают скорость отверждения полимера.

Введение растворителей уменьшает концентрацию и вязкость полимера. Применение пластифицирующих добавок понижает хрупкость отвержденного полимера, а использование стабилизирующих добавок и пенообразователей увеличивает жизнеспособность композиции, снижает расход связующего и увеличивает его объем.

В производстве ДПК наиболее широкое применение получили связующие горячего отверждения на основе термореактивных синтетических смол, к которым относятся карбаминоформальдегидные (КФ-МТ; КФ-МТ (БП); КФ-МТ-ПС; КФ-МТ-15; КФ-МТ-05; КФ-НП; КФ-ЕС; КФ-А; СК-75), фенолоформальдегидные в виде жидких резолов (СФЖ-3011; СФЖ-3013;

СФЖ-3014; СФЖ-3024) и мочевиноформальдегидные смолы. Это синтетические смолы с высокой адгезионной способностью к древесине, отверждаемые под действием высоких температур и давления. Реакция отверждения ускоряется в присутствии различных катализаторов (оксид кальция и магния, минеральные и сульфокислоты). Отвержденные смолы нерастворимы и при повторном нагревании не подвергаются размягчению.

Синтетические смолы получают реакцией поликонденсации фенола или мочевины с формальдегидом. Плиты, изготовленные на таких связующих, имеют высокую водостойкость.

Карбамидоформальдегидные связующие разрушаются под действием горячей воды, имеющей температуру свыше 60 °С. Физико-механические свойства древесно-стружечных плит зависят от количества введенного связующего, содержание которого в многослойных и однослойных ДПК с использованием липы, березы, ольхи — 11 %; бука, осины — 12 % и хвойных пород дерева — 10 %. Полимерные связующие отличаются высокой стоимостью, увеличение их содержание приводит к повышению себестоимости продукции.

В процессе синтеза фенолоформальдегидных смол вводят стабилизаторы, которые повышают срок хранения и обеспечивают стабильность свойств во времени. К ним относятся этиленгликоль (ЭГ), диэтиленгликоль (ДЭГ), полиацетальгликоль с винилокси группами и полиацетальгликоль (ПАГ).

Отвердителями фенолформальдегидных смол в технологии производства ДПК служат сульфокислоты изоцианаты и комбинированные отвердители на основе бихроматов и карбамидов.

Изоцианаты — вещества органического происхождения, которые сокращают время отверждения, уменьшают степень поглощения смолы древесиной. Сульфокислоты ускоряют время отверждения в 1,5–2 раза.

Изделия, полученные на основе фенолформальдегидных олигомеров, имеют повышенную водостойкость, термостойкость и стойкость к атмосферным воздействиям.

Для склеивания массивной древесины применяют клеи холодного отверждения на основе смол СФЖ-3016; СФЖ-309 и ВИАМФ-9, а их отверждение происходит в присутствии сульфокислоты.

Для защиты древесных композитов от воздействия воды применяют гидрофобные (водоотталкивающие) добавки, которые препятствуют попаданию влаги внутрь изделия и вводятся в небольших количествах в древесноволокнистую массу в виде эмульсий.

Для обеспечения прочностных показателей изделий на основе древесноволокнистых масс применяют упрочняющие добавки, вводимые в небольших количествах (менее 1,5 %). К ним относятся, черный технический альбумин и фенолоформальдегидные смолы (СФЖ-3066, СФЖ-3014 и др.) и различные пропитывающие составы (пектол, сырое талловое масло, нефтяной гидрофобизатор), применяемые при изготовлении изделий по мокрому способу.

Для защиты древесных волокон от грибковых поражений и насекомых применяются антисептики, вводимые в количестве 1–2 % по массе сухого древесного наполнителя.

Для производства ДПК применяются вещества, снижающие пожароопасность и носящие название антипиренов, в состав которых входят дициандиамида, ортофосфорная кислота и мочевины.

### 6.3. Клееная фанера

**Фанера** получила широкое распространение и применяется в качестве конструкционного материала.

Главной задачей при конструировании листа фанеры является обеспечение его равнопрочности в двух взаимно перпендикулярных направлениях, касательных плоскости листа.

Существуют следующие виды фанеры и другой фанерной продукции:

- фанера общего назначения (ГОСТ 3916.1–96 «Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона лиственных пород») применяемая для внутреннего потребления мебельной и радиотехнической промышленностью, в судостроении, вагоностроении, автомобилестроении (табл. 6.1);



- фанера авиационная (ГОСТ 102–75 «Фанера березовая авиационная. Технические условия»);
- фанера бакелизированная (ГОСТ 11539–2014 «Фанера бакелизированная. Технические условия»);
- фанера декоративная (ГОСТ 14614–79 «Фанера декоративная. Технические условия»);
- фанерные плиты;
- столярные плиты;
- древесные слоистые пластики (ДСП);
- гнотоклееные детали (заготовки — ГКЗ) (ГОСТ 21178–2006 «Заготовки клееные. Технические условия»);
- древесностружечные плиты (ГОСТ 10632–2014 «Плиты древесно-стружечные. Технические условия»);
- древесноволокнистые плиты (ГОСТ 4598–86 «Плиты древесноволокнистые. Технические условия»);
- массы древесные прессовочные (МДП) (ГОСТ 11368–89 «Массы древесные прессовочные. Технические условия»).

Таблица 6.1

#### Марки фанеры общего назначения

Марка	Связующее
ФСФ	Синтетическое фенолоформальдегидное связующее
ФК	Синтетическое карбамидоформальдегидное связующее
ФБА	Белковое альбумино-казеиновое связующее

Клееная фанера относится к древесно-слоистым композиционным материалам и обладает анизотропными свойствами. Она представляет собой слоистый материал, в котором листы шпона укладывают во взаимно перпендикулярных направлениях волокон. В соответствии с этим процесс усушки и разбухания сопровождается меньшими деформациями по сравнению с натуральной древесиной.

Для придания прочности необходимо сохранить формоустойчивость фанеры, т.е. плоскостность листа. Основной принцип создания фанеры как композиционного материала основан на правиле симметрии листа. Соблюдение данного принципа при производстве фанеры позволит значительно предотвратить ее деформацию. Однако он не будет действовать, если влажность листов шпона будет очень значительной, даже при соблюдении всех правил сборки листа фанеры, и его деформация (коробление) будет неизбежна.

Эти основные принципы симметрии заключаются в следующих правилах (рис. 6.1).

*Первое правило симметрии:* плоскость симметрии листа фанеры должна совпадать с плоскостью симметрии центрального (среднего) слоя.

*Второе правило симметрии:* с каждой стороны от плоскости симметрии на равном расстоянии должно находиться одинаковое число слоев (листов) шпона одинаковой толщины и направления волокон, одной и той же породы древесины и одинаковой влажности, изготовленных одним и тем же способом (лущением, строганием).

Для полного выравнивания напряжений симметричные листы шпона в фанере должны быть обращены наружу одноименной стороной и по возможности подобраны из одинаково удаленных от центра чурака слоев древесины.

Соблюдение первого правила симметрии требует нечетного числа слоев в фанере (рис. 6.1, а). Это требование основано на необходимости иметь наружные слои с одинаковым направлением волокон. При четном числе слоев наружные слои шпона будут иметь одинаковое направление волокон, но плоскость симметрии листа фанеры будет проходить через слой клея (рис. 6.1, б), не совпадая с плоскостью симметрии среднего слоя. В этом случае при изгибе скалывание будет происходить по клеевому слою, прочность которого может быть ниже проч-

ности древесины. При использовании клея, по прочности равного древесине, плоскость симметрии, проходящая по клеевому слою, не будет отрицательно влиять на прочность фанеры.

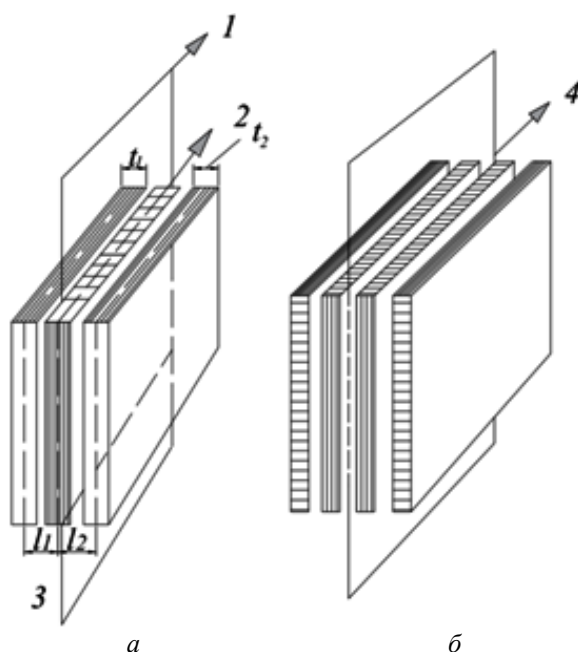


Рис. 6.1. Сборка фанеры по принципу симметрии:

*a* — трехслойной (нечетнослойной); *б* — четырехслойной (четнослойной); 1 — плоскость симметрии листа фанеры; 2 — плоскость симметрии центрального слоя; 3 — плоскость симметрии наружных слоев; 4 — плоскость симметрии четырехслойного листа фанеры

Второе правило симметрии требует, чтобы слои шпона, находящиеся на равном расстоянии от плоскости симметрии, были одинаковой толщины. При нарушении этого правила в листах шпона различной толщины могут появляться неодинаковые напряжения при усушке и набухании, что ведет к их короблению. То же самое наблюдается при несоблюдении симметричности в направлении волокон древесины (шпона). Если в трехслойной фанере один из наружных слоев положить не перпендикулярно среднему слою, а параллельно или под углом, лист фанеры может покоробиться. В первом случае он свернется в трубку, во втором будет покороблен по диагонали.

Не менее важно, чтобы симметричные слои шпона в фанере были из древесины одной и той же породы. Если лист трехслойной фанеры составить из трех пород шпона одинаковой толщины (дуба, березы, сосны), фанера покоробится в сторону более слабой древесины (сосны). Это объясняется разной степенью усушки и разбухания древесины отдельных пород. Усушка и разбухание поперек волокон березового шпона несколько больше, чем усушка соснового, при одной и той же его толщине.

При склеивании фанеры из разных пород древесины необходимо учитывать, что усушка шпона по толщине возрастает с увеличением толщины и падает по ширине листа с увеличением его толщины.

Соблюдение принципов симметрии при сборке листа фанеры в значительной степени устраняет ее деформацию. Однако если разница во влажности листов шпона при соблюдении всех правил сборки листа фанеры будет очень значительна, коробление фанеры неизбежно.

Правильным подбором листов шпона по влажности считается такой подбор, при котором разность во влажности между наружными и внутренними слоями не будет превышать 3 %. Повышенная влажность в наружных слоях фанеры вызывает появление трещин при высыхании, так как клеевой слой препятствует равномерной усушке шпона по ширине.

Деформация листа фанеры может произойти, если наружные слои изготовлены различными способами, например один *луцением*, а другой *строганием*. Для выравнивания напряжений в разнородных по способу изготовления листах шпона подбирают средние слои шпона раз-

личной толщины и влажности. Толщина наружных слоев фанеры должна быть меньше, чем внутренних. Уменьшение толщины наружных слоев позволяет получать из чураков высокого сорта большее число листов высокосортного шпона. Рассмотренные принципы композиции фанеры в основном применимы и к конструкции других видов клееных материалов.

По отношению к центральной оси симметрии, или к плоскости, проходящей посередине толщины листа фанеры, слои шпона должны располагаться в строго определенном порядке: с каждой стороны от центральной оси симметрии должно быть одинаковое число слоев шпона; симметрично расположенные слои шпона должны быть одинаковой толщины и одинаковой влажности; симметрично расположенные слои шпона должны быть изготовлены из одинаковой породы древесины одним и тем же методом; симметрично расположенные слои шпона должны иметь одно и то же направление волокон.

В последние десятилетия за рубежом приобрели большую популярность несколько видов фанерных балок строительного назначения — многослойный брус из шпона, разработанный в США (рис. 6.2) (от англ. *LVL — Laminated Veneer Lumber*).

Подобно листовой фанере балки склеиваются из полос лушеного шпона и имеют стабильные прочностные и эксплуатационные показатели, превосходящие значения показателей пиломатериалов.

Технология производства многослойного бруса из шпона в какой-то степени схожа с технологией производства фанеры. Существует два типа производственных линий: с прессами периодического и непрерывного действия, которые значительно отличаются друг от друга.

Технология линия производства многослойного бруса из шпона с прессом периодического действия включает в себя следующие технологические операции: предварительную обработку древесины, лущение, сушку, склеивание шпона, нарезание шпона на полосы, формирование пакета шпона, горячее прессование, распиловку бруса, упаковку готовой продукции.

Чаще всего на таких производствах используется пресс длиной 18,3 м. Длина готового бруса составляет от 2,5 до 18 м.



Рис. 6.2. Многослойный брус из шпона

Гидротермическую обработку кряжи проходят в специальных бассейнах до снятия коры и раскроя на чураки.

Обогрев бассейнов для гидротермической обработки происходит за счет тепла, подающегося из сушилки. Выгрузка кряжей на транспортер осуществляется мостовым краном.

После гидротермической обработки и окорки кряжи подвергаются разделке на чураки требуемых размеров. Кора с помощью конвейера убирается с линии. Обрезки бревен дробятся и отсылаются в котельную.

Лушение проводится на высокопроизводительной линии. Заболонный и ядровый шпон складываются в отдельные карманы. Отходы и обрезки подаются прямо в барабанную дробилку.

Для сушки шпона используются многэтажные проходные сушилки. На этапе сушки осуществляется сортировка шпона и контроль его влажности. Сухие кусковые отходы, неформатный шпон подаются на линию склеивания шпона. Высушенный шпон поступает на линию усования, где нарезается ус на кромках шпона с двух сторон и производится сортировка по плотности. Усованный и отсортированный шпон подается на линию набора и подпрессовки пакетов.

Подпрессованные заготовки поступают на линию горячего прессования, после чего готовые плиты многослойного бруса из шпона раскраивают на линии обрезки и сортировки бруса в заданный размер и формируют в пачки. Пачки поступают на упаковочный станок, а затем на склад готовой продукции.

Для производства многослойного бруса из шпона используют водостойкие композиции на основе фенолформальдегидных и метилendifенилдиизоцианатовых смол.

Для линий, оснащенных прессами, важным отличием является то, что бесконечный пакет набирается непосредственно на рабочем конвейере линии. При этом для различных марок многослойного бруса из шпона компоновка листов по направлению волокон может быть различной, т.е. для наиболее распространенного случая листы шпона укладывают в пакет с одинаковым (параллельным) направлением волокон. Для некоторых марок часть листов располагается так, что их волокна перпендикулярны волокнам смежных слоев, как и в случае обычной клееной фанеры.

Установленная непосредственно перед прессом непрерывного действия система предварительного подогрева с помощью микроволнового излучения служит для быстрого нагрева пресс-пакета, состоящего из многочисленных слоев шпона. Такой предварительный подогрев увеличивает производительность оборудования и особенно целесообразен в тех случаях, когда необходимо изготовить толстые плиты за короткое время. Применяемые прессы аналогичны прессам для производства ДСП.

Многослойный брус из шпона имеет толщину 21–106 мм. Минимальная ширина бруса составляет 40 мм, максимальная ширина при изготовлении с помощью непрерывного пресса — 1250 мм и 1800 мм для прессов периодического действия. Длина многослойного бруса из шпона составляет от 2,5 до 18 м, но для технологии с применением непрерывных прессов она может быть теоретически бесконечной.

Широкий диапазон размеров позволяет создавать самые разнообразные легкие и прочные перекрытия и кровельные конструкции, включая конструкции больших размеров. Хорошие технологические свойства изделий обеспечивают короткие сроки возведения сложных кровельных конструкций, которые обладая небольшой массой, позволяют частично или полностью исключить применение грузоподъемных механизмов. Многослойный брус из шпона широко применяется в стеновых каркасных конструкциях. Для этой цели используются двутавровые балки, получившие название *I-beams* и *I-joists*. Полка такой балки выполняется либо из древесины хвойных пород, но чаще из многослойного бруса из шпона, а стойку из ориентированно-стружечной плиты (ОСП, OSB) или фанеры. В результате при одинаковой несущей способности *I-beams* существенно легче балок из обычной древесины, пиломатериалов или клееного бруса. *I-beams* выпускают длиной до 18 м.

## 6.4. Древесностружечные плиты

**Древесностружечные плиты (ДСП)** представляют собой листовой материал, изготавливаемый горячим прессованием из древесных частиц толщиной 0,1–0,5 мм, длиной 5–40 мм, шириной 1–10 мм и связующего. Древесные частицы в таких плитах могут располагаться параллельно или перпендикулярно пласти, что оказывает влияние на их свойства.

Существуют способы плоского и экструзионного прессования. При способе *плоского прессования*, который получил наибольшее распространение, древесные частицы располагают преимущественно параллельно пласти плиты. При этом прочность плиты во всех направлениях вдоль пласти плиты является одинаковой. В случае применения *экструзионного прессования* древесный наполнитель располагается перпендикулярно пласти плиты. При этом прочностные свойства плиты неодинаковы в различных направлениях. Такие плиты имеют большую прочность в поперечном направлении и низкую вдоль длины плиты. Плиты, изготовленные по способу экструзионного формования, могут прессоваться с образованием внутренних каналов и носят название многопустотных плит.

В зависимости от содержания связующего и размеров древесного наполнителя по всему поперечному сечению плиты древесностружечные плиты разделяются на однослойные, трехслойные и многослойные

В однослойных плитах размеры древесных частиц и содержание связующего по всему поперечному сечению являются примерно одинаковыми. В трехслойных плитах размеры древесных частиц и содержание связующего внутреннего слоя отличается от двух наружных слоев. В многослойных плитах внутренние слои отличаются ориентацией древесного наполнителя. В таких плитах внутренние и наружные слои расположены симметрично по отношению к среднему слою и отличаются от него типом или размером стружки и (или) других добавок.

Древесностружечные плиты классифицируются по средней плотности на:

- легкие плиты плотностью менее 550 кг/м<sup>3</sup>;
- средние плиты плотностью от 550 до 750 кг/м<sup>3</sup>;
- плиты с высокой плотностью, равной более 750 кг/м<sup>3</sup>.

Содержание формальдегида в связующем на 100 г в различных классах древесностружечных плит (в пересчете на абсолютно сухое состояние):

- класс E1 — менее 8 мг;
- класс E2 — 8–30 мг.

В соответствии с ГОСТ 10632–2007 «Плиты древесно-стружечные. Технические условия», по физико-механическим характеристикам древесностружечные плиты подразделяют на марки П-А и П-Б, а по качеству и виду поверхности — на I и II сорта. ДСП могут иметь обычную и мелкоструктурную поверхность. По гидрофобным свойствам различают обычные ДСП и ДСП повышенной водостойкости с шлифованной и нешлифованной поверхностью.

Для производства ДСП служит специально изготовленная технологическая стружка (или щепа) из древесины хвойных и лиственных пород, которую изготавливают с использованием дисковых многоножевых рубительных машин. Сырьевыми материалами для этих целей выступает окоренная и неокоренная круглая цельная древесина низких сортов или отходы лесопиления и деревообработки.

В соответствии с ГОСТ 15815–83 «Щепа технологическая. Технические условия», для производства ДСП используется стружка со следующими геометрическими параметрами:

- длина — 10–60 мм;
- толщина — менее 30 мм.

Согласно ГОСТ 15815–83, допускается содержание в стружке 0,6–1,0 % минеральных примесей, до 15 % коры, присутствие гнили — до 5 %.

В роли связующих веществ применяются фенолоформальдегидные (СФЖ-3066, СФЖ-3014) и карбамидоформальдегидные (КФ-МТ-БП, КФ-НП КФ-МТ-15, КФ-0,15) смолы. Фенолоформальдегидные смолы имеют темный цвет и используются в производстве плит, предназначенных для эксплуатации в условиях со значительными колебаниями влажности воздуха. Применяются специальные гидрофобные вещества для придания плитам водостойкости.

Производство древесностружечных плит состоит из следующих технологических процессов:

- сортировки сырья, его окорки, разделки на заготовки заданного размера и изготовление, т. е. подготовки древесного сырья к переработке на стружку;
- изготовления стружки;
- сушки стружки и ее классификации;
- измельчения некондиционных грубых частиц;
- смешения сортированной стружки со связующим;
- формирования ковра, его прессования, охлаждения, обрезки плит;
- шлифования плит, контроля качества и сортировки.

Технологический процесс производства древесностружечных плит рассмотрен на примере схемы завода (рис. 6.3), в которой предусмотрено два технологических потока А и Б изготовления и сушки стружки, один поток сортирования и измельчения стружки и три потока смешивания стружки со связующим. Подаваемые кранами 1 пачки долготья поступают на разобшители 2 потоков А и Б, которые выдают бревна поштучно в указанные потоки.

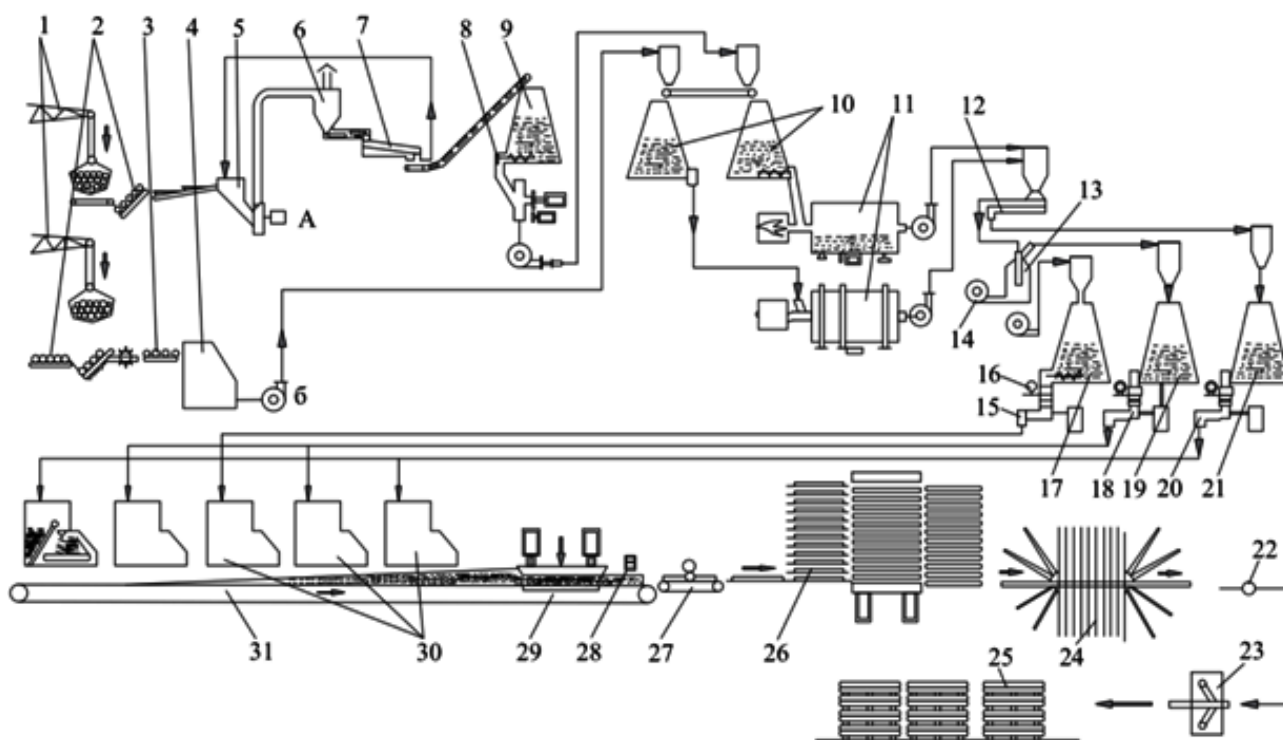


Рис. 6.3. Технологическая схема производства ДСП:

1 — краны; 2 — разобшители; 3 — многопильный станок; 4, 8 — стружечные станки; 5 — рубительная машина; 6 — циклон; 7, 12, 13 — сепараторы; 9 — бункер щепы; 10 — бункеры влажной стружки; 11 — сушилки; 14 — дробилка; 15, 18 и 20 — смесители; 16 — дозатор; 17, 19 и 21 — бункеры стружки; 22 — форматный станок; 23 — шлифовальный станок; 24 — камера охлаждения; 25 — склад готовой продукции; 26, 29 — прессы; 27 — весы; 28 — пильный агрегат; 30 — формирующие машины; 31 — формирующий транспортер; А и Б — технологические потоки

В потоке А долготье перерабатывается в щепу рубительной машиной 5. Полученная щепа просеивается на ситовом сепараторе 7 (сортировке). Кондиционная щепа складывается в кучах, из которых она транспортируется в бункер 9, дозирующий щепа для переработки на центробежных стружечных станках 8. Полученная стружка поступает в бункера 10 влажной стружки.

В потоке Б долготье после разобшителя 2 поступает на многопильный станок 3, где распиливается на заготовки длиной 1 м. Мерные заготовки подаются в стружечный станок 4. Заготовки, диаметр которых превышает допустимый стружечным станком, раскалываются на дровокольном станке; полученные поленья также перерабатываются на стружечном станке 4.



Стружка, полученная в обоих потоках А и Б, может подвергаться дальнейшей обработке раздельно или смешиваться. Стружка из бункеров 10 подается в сушилки 11, откуда поступает на ситовой сепаратор 12, в котором отделяется мелкая фракция стружки, предназначенная для наружных слоев плит. Эта фракция стружки поступает в бункер 21, остальные фракции передаются в пневматический сепаратор 13, где воздушным потоком выделяется стружка для внутреннего и промежуточных слоев плиты. Эти частицы соответственно поступают в бункер 17 стружки для внутреннего слоя и бункер 19 стружки для промежуточных слоев. В пневматическом сепараторе отделяются также некондиционные грубые частицы, которые измельчаются в дробилке 14, после чего полученные фракции обычно повторно направляются в ситовой или пневматический сепаратор.

Схемы потоков сепарации и измельчения стружки, принятые в различных цехах производства древесностружечных плит, могут значительно отличаться как по типам применяемого оборудования, так и по последовательности проведения операций в технологическом процессе. Например, в схеме, получившей в последнее время распространение, используются ситовые сепараторы, которые выделяют мелкую некондиционную фракцию, содержащую в основном минеральные частицы, фракцию для наружных слоев, фракцию для внутреннего слоя и крупную фракцию, поступающую в пневмосепаратор. Поток стружки промежуточного слоя в этом случае не требуется.

Из бункера 17 сухой стружки для внутреннего слоя частицы поступают в дозатор 16, откуда передаются в смеситель 15 для смешивания со связующим. Связующее подается в смеситель установкой клееприготовления. Для смешивания со связующим стружки для наружных и промежуточных слоев используют смесители 18 и 20.

Осмоленная стружка формирующими машинами 30 последовательно насыпается на ленту формирующего транспортера 31, представляющую собой последовательно перемещающиеся жесткие или гибкие поддоны или бесконечную резиновую или стальную ленту. Сформированный стружечный ковер распиливается пильным агрегатом 28 на отдельные пакеты, которые затем подпрессовываются одно- или двухэтажным прессом. При использовании подвижных прессов 29 или прессов непрерывного действия (гусеничных, ленточных или вальцовых) подпрессовывается бесконечный стружечный ковер.

Полученные при подпрессовке брикеты взвешиваются на весах 27, а затем поступают в пресс 26 для горячего прессования. Отпрессованные плиты охлаждаются в камере 24, обрезаются на форматном станке 22 и укладываются в штабеля. После необходимой выдержки штабелей плиты шлифуют на станках 23.

В зависимости от производительности завода, которая обуславливается участком формирования — прессования плит, для осуществления технологических операций подготовки стружки может быть установлено по несколько единиц одинакового оборудования, при этом суммарная их производительность должна быть не ниже заданной для завода.

На заводе древесностружечных плит устанавливается несколько сотен единиц технологического, транспортного и вспомогательного оборудования, для обеспечения надежной работы которого завод разделен на отдельные участки. Эти участки могут работать некоторое время независимо один от другого, благодаря чему короткие остановки одного участка не вызывают перерыва в работе смежных с ним. На границах участков предусматриваются бункера или склады. Представленный на рис. 6.3 завод разделен на следующие участки с соответствующим оборудованием:

- участок подготовки сырья: разобщители 2, рубительная машина 5, ситовой сепаратор 7 для щепы, склад щепы, приемные устройства бункера 9 щепы, многопильный станок 3 и накопители мерных заготовок;
- участок изготовления стружки: выдающее устройство бункера 9 щепы, центробежные стружечные станки 8, стружечные станки 4 и приемные устройства бункеров 10 стружки;
- участок сушки, сепарации и измельчения стружки: выдающие устройства бункеров 10 стружки, сушилки 11, ситовой 12 и пневматический 13 сепараторы, дробилка 14 и приемные устройства бункеров 17, 19 и 21;

- участок смешивания стружки со связующим: выдающие устройства бункеров 17, 19 и 21, дозаторы 16, смесители 15, 18 и 20 и приемные устройства формирующих машин 30.
- участок формирования, прессования, охлаждения и обрезки плит: формирующие машины 30, формирующий транспортер 31 и другие конвейеры для поддонов или стружечных пакетов и брикетов, пресс для подпрессовки 29, пильный агрегат 28, весы 27, пресс для горячего прессования 26, камера охлаждения 24, форматный станок 22, штабелеукладчик для плит и склад для выдержки штабелей плит;
- участок первичной обработки плит: штабелеразгрузчики, шлифовальные станки, толщиномеры и штабелеукладчики.

Технологическое оборудование соединяется между собой различными транспортными устройствами: ленточными и цепными конвейерами, транспортирующими бревна и мерные заготовки, ленточными и скребковыми конвейерами, а также пневмотранспортом, подающими стружку. В технологическое оборудование для обработки щепы и стружки материал должен поступать равномерно и в заданных количествах в единицу времени. Транспортное оборудование также может принимать ограниченное количество древесных частиц. Поэтому из бункера щепы или стружка дозируется в заданном количестве.

На заводах древесностружечных плит почти все оборудование работает в автоматическом режиме.

## 6.5. Древесноволокнистые плиты

**Древесноволокнистые плиты (ДВП)** изготавливают в процессе горячего прессования или сушки массы из древесного волокна, сформированной в виде ковра. Существуют мокрый и сухой способ производства ДВП. При мокром способе производства при формировании ковра применяется вода, а при сухом — воздух. В соответствии с ГОСТ 4598–86 «Плиты древесноволокнистые. Технические условия», ТУ 13-444–83 по плотности различают следующие виды ДВП:

- мягкие (непрессованные) — плотностью 100–400 кг/м<sup>3</sup>;
- полутвердые — плотностью 600–800 кг/м<sup>3</sup>;
- твердые — плотностью 800–1050 кг/м<sup>3</sup>;
- сверхтвердые с плотностью 950–1100 кг/м<sup>3</sup>.

Только полутвердые ДВП изготавливаются сухим способом.

При использовании мокрого способа толщина прессованных плит составляет 2,5–6 мм, в то время как, при сухом способе — 5,0–12 мм; толщина непрессованных плит — 8–16 мм.

ДВП применяется для изготовления элементов мебели, в мебельном производстве в качестве панелей, плит, в деревянном домостроении, в радио- и приборостроении и др.

Для производства ДВП используется технологическая щепы, изготавливаемая как из цельной низкосортной круглой древесины, так и из кусковых отходов лесопиления и деревообработки (горбыли, рейки, карандаши, шпон-рванина от фанерного и спичечного производств и др.).

Технологическая щепы (ГОСТ 15815–83), предназначенная для производства ДВП, должна быть следующих размеров, мм: длина — 10–35 (оптимальная — 20), наибольшая толщина — не более 5. В щепе допускается наличие коры до 15 %, гнили до 5 % и минеральных примесей 0,5–1,0 %. Обугленные частицы и металлические включения в щепе не допускаются. В щепе для производства ДВП не должно быть мятых кромок, а угол среза должен составлять 30–60°. При производстве ДВП опилки в композиции сырья не используют.

Чтобы придать плитам формоустойчивость, при их изготовлении применяют гидрофобные (водоотталкивающие) вещества (парафин, дистиллятный гач, церезин и церезиновая композиция). Гидрофобные добавки вводят в древесноволокнистую массу в виде специально приготовленных и разбавленных горячей водой щелочных эмульсий. В качестве вспомогательных веществ для получения эмульсий применяют лигносульфонаты технические, гидроксид натрия (едкий натр), аммиак и некоторые другие.



После перемешивания с древесноволокнистой массой эмульсии осаждаются на древесных волокнах водными растворами осадителей, в качестве которых применяют серную кислоту или сернокислый алюминий.

В качестве упрочняющих добавок используют фенолоформальдегидные смолы (СФЖ-3066, СФЖ-3014 и др.), черный технический альбумин (белковый клей, не водостойкий), пропитывающие составы.

Пропитывающие составы применяют при производстве сверхтвердых ДВП мокрым способом.

Технологический процесс производства древесноволокнистых плит включает в себя: прием, складирование и подготовку древесного сырья, получение древесных волокон, прием и складирование химических веществ, приготовление проклеивающих составов, проклеивание древесноволокнистой массы, формирование ковра, форматную резку ковра, горячее прессование или сушку, термообработку и увлажнение плит, форматную резку и складирование готовых плит.

Производительность одной технологической линии современного завода древесноволокнистых плит обусловлена производственной мощностью головного агрегата — гидравлического пресса для горячего прессования (или сушилки), для обеспечения которой на всех других технологических операциях устанавливают по несколько единиц однотипного оборудования. Суммарная производительность этого оборудования должна превышать заданную производительность завода.

По ГОСТ 4598–86 сверхтвердые плиты имеют среднюю плотность не менее  $950 \text{ кг/м}^3$ ; твердые — не менее  $850 \text{ кг/м}^3$ ; полутвердые — не менее  $400 \text{ кг/м}^3$ ; изоляционно-отделочные —  $250\text{--}350 \text{ кг/м}^3$ ; изоляционные — до  $250 \text{ кг/м}^3$ . Размеры плит, мм: длина —  $1200\text{--}3600$ , ширина —  $1000\text{--}1800$ , толщина —  $3\text{--}8$ .

Важнейший показатель качества древесноволокнистых плит — предел прочности при изгибе. Временное сопротивление статическому изгибу по ГОСТ 4598–86 должно быть не менее,  $\text{кгс/см}^2$ : для сверхтвердых плит — 500; для твердых плит — 400; для полутвердых плит — 150; для изоляционно-отделочных плит — 20; для изоляционных плит — 12.

Существенный показатель качества сверхтвердых, твердых и полутвердых плит — гигроскопичность. ГОСТ 4598–86 допускает величину набухания плит после суточного нахождения испытываемых образцов в воде: для твердых и полутвердых — не более 20 %, а для сверхтвердых — не более 12%. Водопоглощение: для сверх твердых плит — 15 %, для твердых — 30 %, для полутвердых — 40 %. Плиты, изготовленные сухим способом, обладают значительно меньшей гигроскопичностью —  $10\text{--}12 \%$ , так как при их изготовлении применяют фенолформальдегидные смолы.

Коэффициент теплопроводности для изоляционных плит должен быть не более  $0,06 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$  и для изоляционно-отделочных плит —  $0,08 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ .

Древесно-полимерные композиционные материалы отличаются экологической чистотой, высокой водостойкостью и морозостойкостью, биостойкостью, низкой себестоимостью, технологичностью. Кроме того, отходы и изделия из разработанных экологически чистых древесно-полимерных композиций могут подвергаться повторной переработке термобарическими методами, что позволяет создать практически безотходный технологический процесс. Они могут быть использованы в строительной, мебельной, деревообрабатывающей, машиностроительной и других отраслях промышленности, в частности, в авто- и вагоностроении, в производстве тары, материалов для облицовки административных и жилых помещений, профильно-погонажных деталей, оконных и дверных блоков, теплоизоляционных плит, отделочной плитки, наличников, подоконников, поручней, плинтусов, игрушек, опалубки.

# ГЛАВА 7. ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

## 7.1. Общие понятия и положения

Современные полимерные материалы, в первую очередь полимерные композиционные материалы (композиты, или ПКМ), являются основой для создания самых разнообразных изделий бытового и технического назначения, науки, спорта и туризма, медицины и многих других областей применения. Давно прошло время, когда основными конструкционными материалами были только металлы, камень, керамика, древесина, текстиль из природных волокон. И хотя эти традиционные материалы сегодня имеют такое же важное значения, технический прогресс был бы невозможен без создания новых материалов с заданными функциональными свойствами. Поэтому в развитых странах огромное значение уделяется как совершенствованию традиционных видов материалов, так и принципиально новым материалам — композиционным, их созданию, изучению свойств, расширению областей применения.

Среди современных материалов важное значение имеют полимерные материалы конструкционного назначения, в том числе армированные полимерные материалы (волоконистые полимерные композиты), применение которых дает существенные преимущества в технологичности, снижении материалоемкости и стоимости изделий, улучшении их эксплуатационных характеристик, повышении надежности.

Появление полимерных материалов относится к середине XX в., и в настоящее время они широко используются во многих видах изделий и конструкций. Можно смело прогнозировать дальнейшее развитие этой области в XXI в., когда на базе новых технологий и современного материаловедения будут существенно улучшены уже проверенные виды полимерных материалов и созданы материалы с новыми более высокими функциональными характеристиками.

Полимерные материалы конструкционного назначения можно условно разделить на две основные группы.

**1. Ненаполненные пластмассы без наполнителей** — чистые смолы, в основном термопласты — полиолефины, полиамиды, полиэфиры, полиуретаны и другие. Это чисто полимерные материалы с небольшим количеством добавок (красителей, пластификаторов и стабилизаторов). К ним относятся следующие:

- органическое стекло (полиметилметакрилат) — имеет высокую светопрозрачность (пропускает 91 % солнечного света, до 75 % ультрафиолетовых лучей), легче обычного стекла, не обладает хрупкостью, легко обрабатывается, применяется для остекления детских учреждений, больниц и санаториев. Недостаток органического стекла — низкая поверхностная прочность и старение;
- полистирол — обладает химической стойкостью, высокими электроизоляционными свойствами, прозрачен, легко окрашивается. Применяется как отделочный материал для стен помещений с повышенной влажностью, для изготовления вентиляционных решеток, дверных ручек и получения пенопластов. К недостаткам следует отнести его хрупкость, низкую теплостойкость, старение;
- полиамиды (найлон, капрон и др.) — обладают малой истираемостью, высокими электроизоляционными и антифрикционными свойствами. Применяются для изготовления мелких строительных деталей, санитарно-технических изделий, профилей, коврового покрытия полов;
- поливинилхлорид жесткий (винипласт) — термопластичный материал, выпускается в виде жесткого листа или профиля любой конфигурации. Бывает двух марок: ВН (непрозрачный) и ВП (прозрачный). Листовой непрозрачный винипласт используется для устройства антикоррозионных вентиляционных коробов в промышленном строительстве, водосточных труб, желобов, облицовки перегородок и дверей. Прозрачный материал применяется в светопрозрачных конструкциях-панелях, фонарях, перегородках;

- фторопласты — обладают высокой химической стойкостью, хорошими электроизоляционными и антифрикционными свойствами. Применяются в химическом машиностроении, мостостроении (в опорных частях и накаточных устройствах при движении пролетных строений мостов);
- пленочные материалы (пленки полиэтиленовые, поливинилхлоридные и др.) — получают экструзией или вальцово-каландровым способом. Полимерные пленки обладают водо-, паро- и газонепроницаемостью, являются гидроизоляционными материалами повышенного качества. Применяются для устройства гидроизоляции в тоннеле- и мостостроении, гидротехническом и промышленном строительстве. Выпускаются просвечивающиеся, полупрозрачные пленочные материалы. Они эластичны, легко моются, износо- и водостойки, поэтому их можно использовать для декоративной отделки стен помещений с влажным режимом работы.

В качестве ненаполненных пластмасс используются в основном термопласты — полиолефины, алифатические и ароматические полиамиды, полисульфоны, фторопласты, эластомеры (резины) и др., в редких случаях реактопласты.

**2. Полимерные композиционные материалы** — многокомпонентные материалы. Их свойства существенно зависят от состава и свойств составляющих их компонентов, взаимного расположения компонентов, взаимодействия между ними и межфазной границы между компонентами.

В свою очередь полимерные композиты можно также условно разделить на две основные группы:

- дисперсно-наполненные пластики — состоят из полимерной матрицы и порошкообразного или коротковолокнистого наполнителя, вводимого для придания материалу определенных функциональных свойств, или удешевляющего материал без заметного изменения его механических или других функциональных свойств, иногда их называют просто — «наполненные пластики»;
- волокнистые полимерные композиты — состоят из армирующего волокнистого наполнителя и полимерного связующего матрицы.

Основные виды полимерных конструкционных материалов, в основном композиты, суммированы в табл. 7.1.

Таблица 7.1

**Основные виды полимерных конструкционных материалов**

Материалы	Наполнители	Матрицы (связующие)
Без наполнителей	–	Термопласты
Дисперсно-наполненные композиты	Дисперсные наполнители (порошки, короткие волокна)	Термопласты, реактопласты, углеродная матрица
Волокнистые/текстильные композиты (армированные полимерные материалы или армированные пластики)	Волокнистый наполнитель (нити, текстиль, бумага), нитевидные кристаллы	Термопласты, реактопласты, углеродная матрица, эластомеры
Композиты с комбинированным наполнителем	Волокнистый наполнитель и дисперсные добавки	Термопласты, реактопласты, углеродная матрица

В дисперсно-наполненных пластиках используются различные виды органических и неорганических наполнителей с небольшими размерами частиц (значительно меньше критического, включая короткие волокна), матриц термо- и реактопластов, а также эластомеров. К дисперсно-наполненным относятся также волокнистые композиты, волокна которых имеют более низкие физико-механические характеристики, чем у матрицы, поэтому они, строго говоря, не являются армирующими компонентами. Однако в ряде случаев такой состав позволяет придавать материалу специфические функциональные свойства, например, антифрикционные при применении полиамидных или фторполимерных волокон.

Свойства волокнистых полимерных композитов существенно зависят от составляющих их компонентов, их состава и свойств, взаимного расположения, свойств межфазной границы раздела, а в некоторых случаях от диффузии компонентов матрицы в волокна. В армированных полимерных материалах используются различные виды органического и неорганического волокнистого наполнителя в виде резаных волокон, нитей, лент, жгутов, тканей, нетканых материалов и войлоков, нитевидных кристаллов и других волокнистых структур.

Основу армированных полимерных материалов составляют волокнистые армирующие наполнители, объединенные в монолитный композиционный материал матрицей или связующим. В армированных полимерных материалах в качестве матрицы могут быть использованы различные полимеры — термопласты и реактопласты, а также эластомеры (каучуки и резины). Для армирования современных композитов наряду с традиционными природными волокнами и стекловолокнами все шире применяются армирующие химические волокна и нити с высокими механическими и термическими характеристиками, позволяющие создавать конструкционные материалы с совершенно новыми функциональными свойствами.

В качестве матрицы в дисперсно-наполненных и волокнистых полимерных композиционных материалах применяются различные виды полимеров:

- термопласты — полиолефины, алифатические и ароматические полиамиды, полисульфоны, фторопласты и др.;
- реактопласты — фенопласты (фенол-формальдегидные, фенольные), аминопласты (меламино- и мочевиноформальдегидные), эпоксидные, полиэфирные, полиимидные, кремнийорганические и другие.

В резино-текстильных материалах и изделиях используются различные виды эластомеров — природные и синтетические каучуки.

В волокнистых полимерных композитах армирующий наполнитель, состоящий из волокон или нитей, воспринимает механические нагрузки, определяя основные механические свойства материала — прочность, деформативность, жесткость. Полимерная матрица (связующее), находящаяся в межволоконном пространстве, служит для распределения механических напряжений между волокнами или нитями (хотя матрица тоже частично воспринимает механические нагрузки) и, что очень важно, определяет монолитность материала.

Расположение волокон или нитей в армированном композиционном материале должно зависеть от направления действующих нагрузок с целью наиболее полной реализации физико-механических свойств в готовом материале или изделии. Расположение волокон задается как структурой волокнистого наполнителя, так и условиями получения материала/изделия.

Самостоятельную группу полимерных композиционных материалов составляют *резино-текстильные материалы и изделия*. Процессы их изготовления, свойства и применение принципиально иные, по сравнению с конструктивными волокнистыми полимерными композитами. Их особенностью является не только применение высокоэластичной полимерной матрицы (каучука, резины), но и то, что эти армированные материалы создаются почти исключительно как готовые изделия. В отличие от конструктивных композитов в резинотекстильных материалах и изделиях работают проклеенные нити, их расположение также определяется направлениями действующих нагрузок.

## 7.2. Композитная арматура

В настоящее время производятся следующие виды арматуры из композитных материалов:

- арматура композитная полимерная;
- фибробетон со стальной и неметаллической фиброй;
- системы внешнего армирования (холсты, ткани, ламелии, ламинаты);
- композитные трубы;
- композитные профили (уголки, швеллеры, тавры и т.д.);
- композитные шпунты.

**Неметаллическая композитная арматура** (англ. *fibre-reinforced plastic rebar, FRP rebar*) представляет собой композиционный материал, состоящий из связующего синтетического

полимера и армирующих нитевидных волокон. В зависимости от типа армирующих волокон различают композитную арматуру: углепластиковую, стеклопластиковую, базальтопластиковую и органопластиковую арматуру.

Основные преимущества конструкций, армированных композитной арматурой, заключаются в долговечности и коррозионной стойкости, электромагнитной нейтральности, диэлектрических свойствах арматуры, высокой прочности и низком удельном весе арматуры. Композитная арматура применяется при берегоукреплении, в морских и припортовых сооружениях, в изделиях из бетонов с преднапряженным и ненапряженным; дорожных и тротуарных плитах и др.

Начало применения композитных материалов в технике относится к середине прошлого века.

Неметаллическая арматура — это композитный материал, состоящий из пучка ориентированных волокон диаметром 8–20 мкм и полимерного связующего, чаще всего на основе эпоксидной смолы и ее модификаций. Содержание волокна (наполнителя) составляет примерно 80–85 % по массе. Волокна в арматуре воспринимают растягивающие усилия, их механические свойства определяют прочность и деформативность арматуры.

Полимерное связующее играет роль клеящей среды, которая объединяет отдельные волокна в монолитный стержень и тем самым обеспечивает совместную работу волокон. Кроме того, связующее защищает волокно от непосредственного воздействия влаги, различных химических реагентов и механических повреждений.

В зависимости от вида волокна неметаллическую арматуру можно подразделить на стеклопластиковую, для изготовления которой используют стеклянные волокна, базальтопластиковую — базальтовые волокна, углепластиковую — углеродные волокна и т.д. В нашей стране наиболее широко изучена и применяется стеклопластиковая арматура. Ведутся научно-исследовательские работы по созданию и определению возможных областей применения других видов неметаллической арматуры, изготавливаемой на основе базальтовых, углеродных и араминных волокон.

Свойства композитной арматуры можно подобрать путем выбора смолы, типа армирующего материала, ориентации армирующего материала и его содержания. Выбор волокон основывается на требованиях к прочности, жесткости и долговечности, а выбор матрицы зависит от окружающей среды, в которой будет находиться композит, и технологии производства самого композита.

Все указанные волокна выдерживают значительные напряжения, различаются по своим физическим свойствам, наиболее важные из которых — жесткость и деформация растяжения. Свойства этих типов волокон представлены на рис. 7.1.

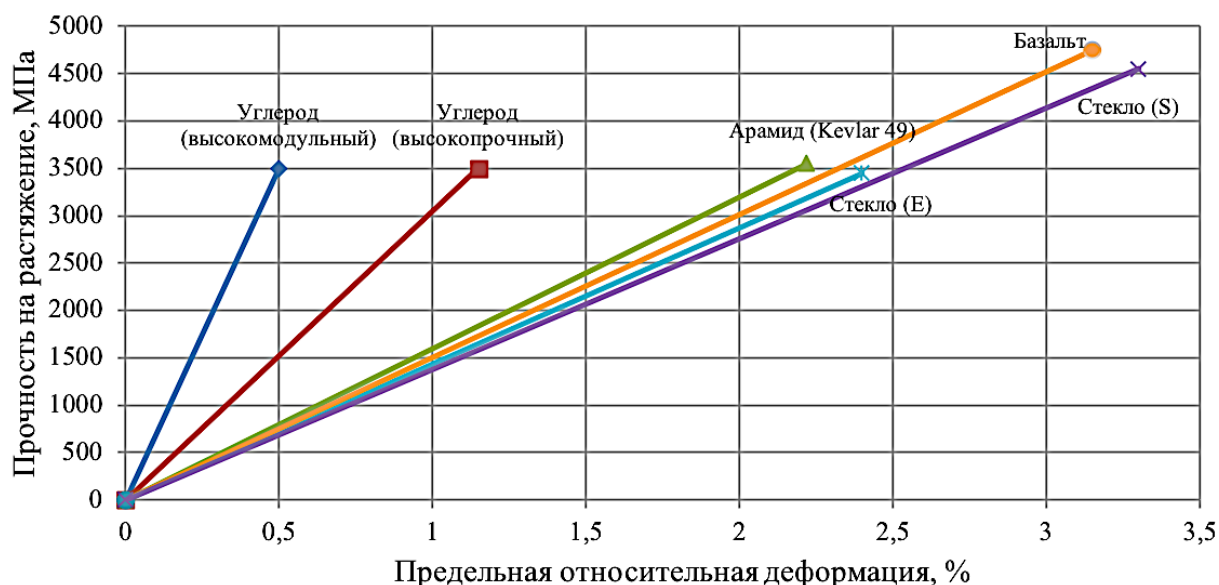


Рис. 7.1. Диаграмма растяжения для основных типов армирующих волокон

Механические свойства композитной арматуры улучшаются при увеличении содержания армирующего материала. Однако существует предел, после которого увеличение количества волокна в композите не обеспечивает дальнейшего улучшения его свойств. Это объясняется тем, что полимерная матрица не может окружить все волокна, если они расположены слишком плотно.

Сравнительные характеристики некоторых волокон представлены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

**Сравнительная характеристика различных видов волокон**

Свойства	Вид волокон		
	углеродные	стеклянные	базальтовые
Плотность, $\times 10^{-3}$ кг/м <sup>3</sup>	1,5–1,8	2,5	2,75
Предел прочности при растяжении, ГПа	1,5–3,5	3–4,6	1,8–2,8
Модуль упругости при растяжении, ГПа	150–600	70–85	95–100
Термический коэффициент линейного расширения, град <sup>-1</sup>	$-1,5 \times 10^{-6}$	$5,6 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$
Теплостойкость, °С	700–2000	500	600

Углеродные волокна обладают комплексом ценных механических и химико-физических свойств, поэтому проявили себя как наиболее подходящие для применения в строительстве. Они обладают высокой тепло- и атмосферостойкостью, устойчивостью к действию света и проникающей радиации, химической стойкостью ко многим реагентам (концентрированные кислоты и щелочи, практически все растворители). На них воздействуют лишь сильные окислители при нагревании. Углеродные волокна биостойки и биоинертны, жаростойки и трудногорючи. Они мало гигроскопичны, но благодаря развитой поверхности адсорбируют водяные пары (до влажности порядка 0,2–2 %), не меняя при этом своих физико-механических свойств.

Углеродные волокна имеют различные электрофизические свойства (от полупроводников до проводников) и, хотя сами не подвержены коррозии, могут вызывать электрохимическую коррозию при контакте со сталью.

Углеродные волокна выдерживают высокие циклические нагрузки, не подвержено ползучести или коррозии под напряжением, а релаксация напряжений и коэффициент термического расширения у него меньше, чем у стальных канатов, применяемых для предварительного напряжения бетона.

В зависимости от технологии производства и исходного материала углеродные волокна можно условно разделить на две группы: высокомодульные и высокопрочные. Существуют также волокна, в которых сочетаются высокая прочность и высокий модуль упругости. Одним из недостатков углеродных волокон является их невысокая относительная деформация при разрыве.

Углеродные композиты имеют самую высокую стоимость из рассматриваемых типов.

Существует множество разновидностей волокон из стекла, из них в строительстве в основном применяются три типа: E, S и AR.

Стеклопластик обладает высокой прочностью, низкой теплопроводностью, устойчивостью к агрессивным средам и резким перепадам температур, био-, влаго- и атмосферостойкостью. Стеклопластик трудногорюч и при пожаре не выделяет ядовитых газов. Кроме того, по сравнению с углепластиком он имеет хорошие электроизоляционные свойства.

К недостаткам стеклопластика следует отнести подверженность коррозии под напряжением, релаксации напряжений, а также чувствительность к влажности и щелочам. Это относится к алюмоборосиликатному стекловолокну, поэтому при изготовлении ПКМ с применением этого волокна к полимерному связующему предъявляют повышенные требования по химической защите волокна от воздействия агрессивных сред. Этим требованиям наилучшим образом отвечает эпоксифенольное полимерное связующее.

Наиболее дешевым является стекловолокна типа E, что делает его наиболее применяемым. Стекловолокно типа S обладает более высокой прочностью и модулем упругости по сравнению с другим типом. Кроме того, к настоящему времени как в нашей стране, так и за рубежом, разработаны щелочестойкие (AR) стекловолокна с применением циркония.

*Арамид* — сокращенное название ароматического полиамида. Высокопрочные и высокомодульные арамидные волокна обладают уникальным комплексом свойств: высокой прочностью при растяжении и модулем упругости, хорошими усталостными и диэлектрическими свойствами, незначительной ползучестью. Благодаря низкой плотности арамидные волокна по удельной прочности превосходят все известные в настоящее время армирующие волокна и металлические сплавы. Арамидные волокна отличаются хорошей способностью к текстильной переработке: так, сохранение прочности после ткачества составляет 90 % исходной прочности нитей, что дает возможность применять их в качестве тканых армирующих материалов.

Арамидные волокна являются наиболее термостойкими из всех рассмотренных, однако они чувствительны к влажности и ультрафиолетовому излучению, а также подвержены релаксации и коррозии под напряжением. Из-за этого арамид сравнительно редко применяются в строительстве — в основном для защиты колонн от ударной и взрывной нагрузки.

Альтернативными материалами, близкими по объему производства и стоимости к стеклянным волокнам, являются *базальтовые*. Как видно из табл. 7.2, по своим физико-механическим характеристикам базальтовые волокна близки к стеклянным. В то же время при сравнении их химического состава с наиболее распространенными алюмоборосиликатными волокнами наблюдается присутствие значительного количества (более половины) оксидов металлов, что делает их более хемо- и термостойкими.

Базальтовые волокна в качестве армирующего наполнителя используют в виде коротких ультратонких волокон (диаметром  $d = 0,4$  мкм), коротких тонких ( $d = 3-4$  мкм) и длинномерных ( $d = 9-12$  мкм) волокон, крученых нитей, лент, тканей различного переплетения.

Базальт относится к числу аморфных неорганических полимеров с различным составом звеньев в полимере. В зависимости от места нахождения базальта его состав изменяется в узких пределах и соответственно не столь резко изменяются и его свойства. Оксиды железа, присутствующие в структуре волокон базальта, придают им бурую окраску.

Базальтовые волокна формируют из расплава по технологии, близкой к производству стеклянных волокон из природного сырья вулканического происхождения. Колебания в параметрах свойств волокон определяются условиями формования (длительностью, степенью гомогенизации расплава, температурой вытяжки) и диаметром волокон.

Базальтовое волокно производят из различных горных пород близких по химическому составу — базальта, базанитов, амфиболитов, габро-диабазов или их смесей. Производство базальтовых волокон основано на получении расплава базальта в плавильных печах и его свободном вытекании через специальные устройства. Температура плавления — 1450 °С. Базальтовое волокно имеет лучшие физико-механические свойства, чем у стекловолокна и существенно дешевле, чем углеродное волокно. Главные преимущества — огнестойкость и тепло- и звукоизолирующая способность, стойкость к химическому воздействию: базальтовые волокна обладают хорошей стойкостью к действию органических веществ (масел, растворителей и др.), а также к воздействию щелочей и кислот.

Роль полимерной матрицы в ПКМ заключается в придании изделию необходимой формы и создании монолитного материала. Матрица объединяет в одно целое многочисленные волокна и позволяет композиции воспринимать различного рода внешние нагрузки: растяжение (как в направлении армирования, так и перпендикулярно ему), сжатие, изгиб, сдвиг.

В то же время матрица принимает участие в создании несущей способности композиции, обеспечивая передачу усилий на волокна. За счет пластичной матрицы осуществляется передача усилий от разрушенных или дискретных (коротких) волокон соседним волокнам и уменьшение концентрации напряжений вблизи различного рода дефектов. Матрица служит и защитным покрытием, предохраняющим волокна от механических повреждений и окисления, поэтому должна выдерживать большие деформации, чем волокна. От полимерной матрицы зависят тепло- влагостойкость, стойкость к действию агрессивных сред, прочностные, ди-

электрические и другие свойства композитной арматуры. Поэтому полимерную матрицу для композитов выбирают исходя из условий эксплуатации изделия.

В целом, чем меньше смолы в композите (при условии его полной пропитки), тем прочнее готовое изделие и тем меньше его масса.

В качестве матрицы для волокнистых полимерных композиционных материалов, применяемых в строительстве, в настоящее время наиболее часто применяются полиэфирные и эпоксидные смолы, относящиеся к так называемым термореактивным смолам. Эти смолы обладают высокими упруго-прочностными характеристиками, хорошей технологичностью и термостойкостью. Их недостатком является низкая вязкость разрушения, определяемая малой долей пластических деформаций. Основные свойства применяемых при изготовлении композитной арматуры смол представлены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Свойства связующих, применяемых для изготовления композитной арматуры

Тип матрицы/смолы	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на растяжение, МПа	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Коэффициент температурного расширения, $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Полиэстер	1200–1400	34,5–104	2,1–3,45	0,35–0,39	55–100
Эпоксид	1200–1400	55–130	2,75–4,10	0,38–0,40	45–65
Винилэстер	1150–1350	73–81	3,0–3,5	0,36–0,39	50–75
Полиэфирэфиркетон (PEEK)	1320	100	3,24	0,40	47
Полифениленсульфид (PPS)	1360	82,7	3,30	0,37	49
Полисульфон (PSUL)	1240	70,3	2,48	0,37	56

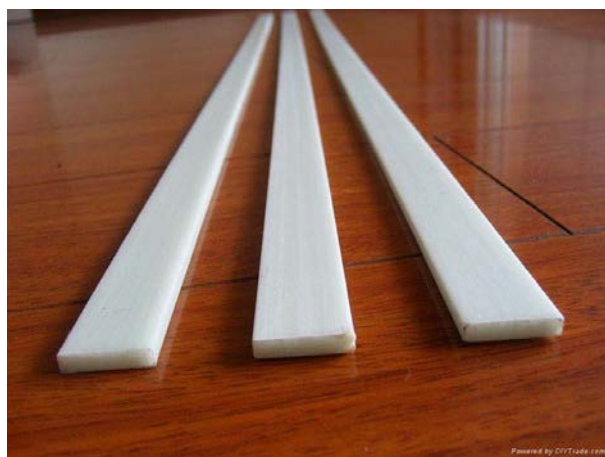
**Типы композитной арматуры.** Одним из первых типов композитной арматуры была стержневая стеклопластиковая арматура, изучению работы которой посвящено значительное количество исследований. В настоящее время доступны следующие типы композитной арматуры: углепластиковая, стеклопластиковая, органопластиковая, базальтопластиковая и гибридная для внешнего и внутреннего армирования в виде стержней, сеток, тканей, пластин, полос (ламинаты), канатов.

*Стержневая арматура* в свою очередь подразделяется на типы в зависимости:

- от формы поперечного сечения — круглая (рис. 7.2, а), прямоугольная, сплошная (рис. 7.2, б) и кольцевая (трубчатая);
- вида внешнего покрытия-профиля (рис. 7.3) — внешняя навивка дополнительных волокон, профиль, созданный деформированием стержня, покрытие песком.



а



б

Рис. 7.2. Типы сечений стержневой композитной арматуры



Ткани и полосы используются, как правило, для внешнего армирования при усилении конструкций. В отличие от стальной арматуры в настоящее время отсутствуют нормативные требования к форме, типу поверхности и методам изготовления композитной арматуры.

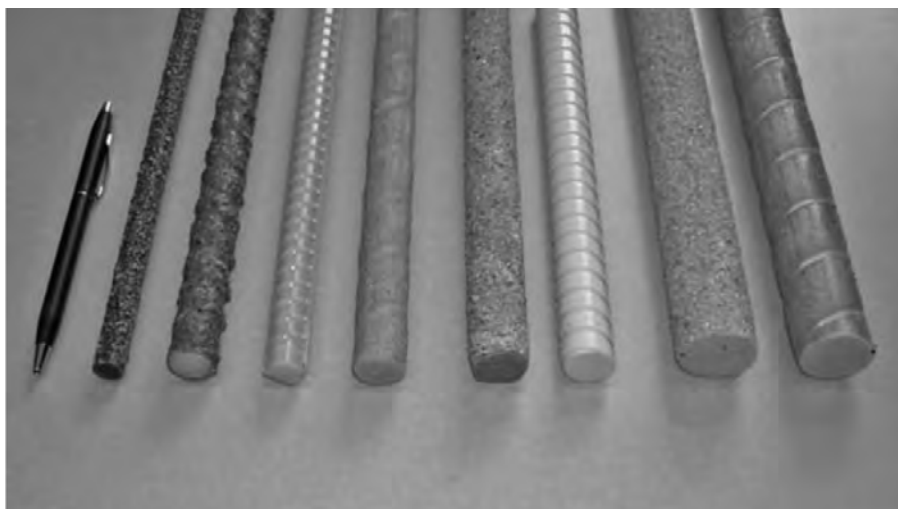


Рис. 7.3. Характерные типы профиля стержневой композитной арматуры

Разработанные проекты российских стандартов (ГОСТ и СТО) устанавливают требования к композитной арматуре в общем виде. ГОСТ не будет распространяться на арматуру гладкого профиля.

Предложенная структура условных обозначений композитной арматуры представлена на рис. 7.4. Пример условного обозначения в документации и при заказе арматуры, изготовленной из стеклопластика, номинальным диаметром 12 мм, с пределом прочности при растяжении 1000 МПа, модулем упругости при растяжении 50 Гпа — АНК-С12-1000-50, ГОСТ ... длина 14 м.

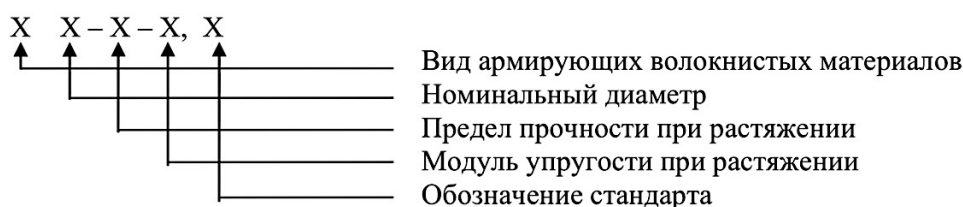


Рис. 7.4. Структура условных обозначений композитной арматуры

Тип армирующих волокнистых материалов обозначают буквами: С — стеклянное волокно; Б — базальтовое волокно; У — углеродное волокно; А — арамидное волокно.

Неметаллическую композитную гибридную арматуру обозначают двумя буквами, указывающими на тип армирующих волокнистых материалов, при этом первая буква указывает на доминирующий компонент.

Предусмотрен выпуск композитной арматуры номинальным диаметром 6–30 мм. Требования к внешнему виду включают следующие условия: боковая поверхность стержней должна быть рельефной, периодического профиля или с анкерными уширениями. Конкретных требований к виду профиля не предъявляется. Указано, что композитная арматура может иметь различный периодический профиль, обеспечивающий требуемую прочность сцепления стержня с бетоном (не менее  $\tau = 10$  МПа для бетона В25).

Разрабатываемая ранее в СССР стеклопластиковая арматура периодического профиля для преднапряженных конструкций являлась самоанкерующейся в бетоне. Данное условие соблюдалось при диаметрах не выше 6 мм и прочности бетона выше М250 и было основано на эмпирических данных. Специальных указаний для других типов арматуры не имелось.

Вопросы выполнения надежных захватных и анкерных устройств долгое время оставались проработаны слабо, что ограничивало применение преднапряженной композитной арматуры и не позволяло полностью использовать потенциал ее прочности в конструкциях.

Применение различных типов захватных и анкерных устройств может приводить к неравномерной передаче напряжений по сечению стержня композитной арматуры и соответственно к снижению ее прочностных показателей. Основные типы применяемых анкерных и захватных устройств представлены на рис. 7.5.

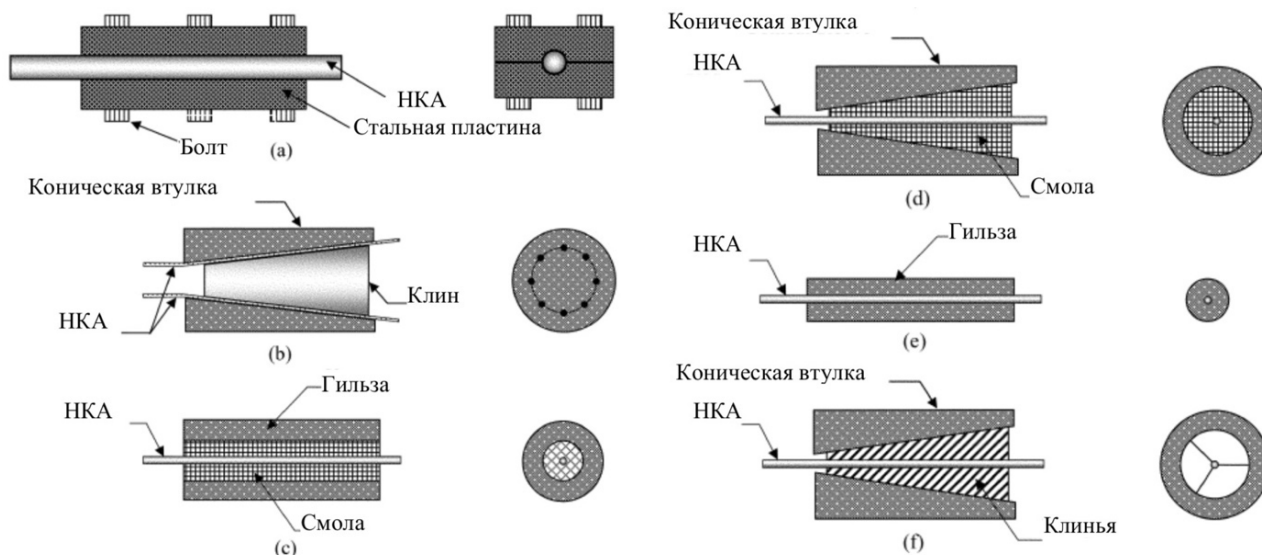


Рис. 7.5. Типы анкерных и захватных устройств для композитной арматуры

На рис. 7.6 представлено захватное устройство для основных испытаний физико-механических свойств композитной арматуры.

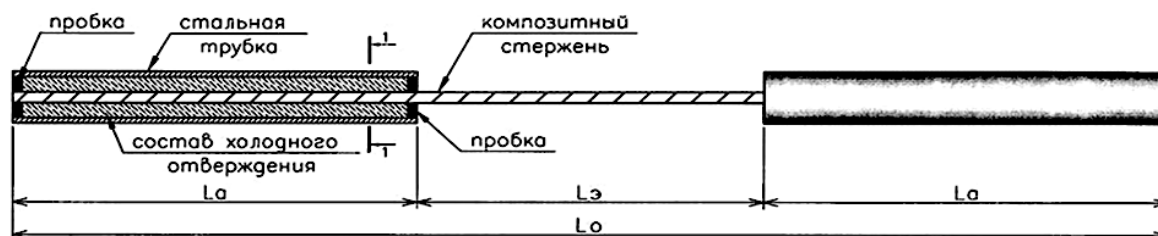


Рис. 7.6. Захватное устройство для испытаний физико-механических свойств композитной арматуры

**Физико-механические свойства композитной арматуры.** Плотность композитной арматуры может быть определена как плотность композитного материала в зависимости от плотности его компонентов (армирующих волокон и матрицы) при объемной доле волокон 0,5–0,75 (наиболее характерное соотношение в композитной арматуре). Так плотность углепластиковой арматуры — 1430–1670 кг/м<sup>3</sup>, органопластиковой — 1300–1450 кг/м<sup>3</sup>, стеклопластиковой — 1730–2180 кг/м<sup>3</sup>, что меньше плотности стальной арматуры в 3,6–6,0 раз.

Коэффициент температурного расширения композитной арматуры зависит от типа волокон, матрицы и их объемного соотношения. Как правило, композитная арматура является ортотропным материалом, данные по основным свойствам и коэффициенту температурного расширения представлены в табл. 7.4 и 7.5.

В отличие от стальной арматуры, значение коэффициента температурного расширения которой близко к его значению для бетона, коэффициенты температурного расширения композитной арматуры и бетона существенно различаются.

Возможность применения композитной арматуры в конструкциях ограничивается температурой стеклования полимерной матрицы (температурой, при которой полимерная матрица необ-

ратимо меняет свои физико-механические свойства). Температура стеклования для композитной арматуры зависит от типа матрицы и находится в диапазоне от 70 до 175 °С. После достижения температуры стеклования прочностные и деформационные свойства композитной арматуры резко снижаются с нарушением сцепления с бетоном. Рекомендуется ограничивать условия эксплуатации конструкций температурой на 30 °С ниже, чем температура стеклования.

Таблица 7.4

**Основные характеристики арматуры диаметром 6 мм**

Вид арматуры	Прочность на растяжении, МПа	Модуль упругости, МПа	Относительное удлинение, %	Электрическая прочность, кВ/с
Стеклопластиковая: на алюмоборосиликатном волокне	1750	$5,5 \times 10^4$	2,7	19–20
на стеклянном волокне с добавкой циркония	1400	$5,0 \times 10^4$	2,8	20–22
Базальтопластиковая	1200	$5,0 \times 10^4$	3,0	20–21

Таблица 7.5

**Коэффициенты температурного расширения различных видов арматуры,  $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$**

Направление	Сталь	Бетон	Углепластик	Органопластик	Стеклопластик
Вдоль стержня (продольное)	11	7-13	-9-0	-2- -6	6-10
Поперек сечения (радиальное)	11	7-13	74-104	60-80	21-23

Высокие температуры могут привести не только к нарушению структуры композитной арматуры, но и откалыванию защитного слоя за счет значительного поперечного расширения стержня при нагреве. Низкие температуры также могут приводить к нарушению сцепления арматуры с бетоном и внутренним микрповреждениям внутри самого композита.

Схема опытно-промышленной линии по изготовлению стекло- и базальтопластиковой арматуры методом пултрузии приведена на рис. 7.6.

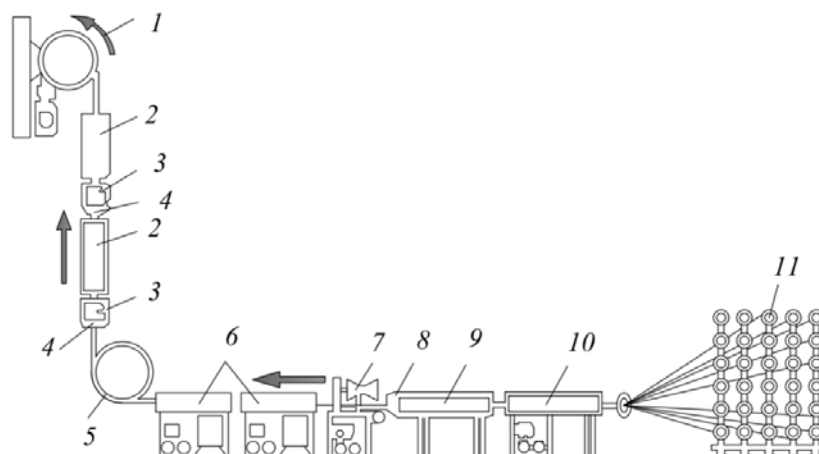


Рис. 7.6. Схема технологической линии по производству неметаллической арматуры:

1 — тянущее устройство; 2 — электрическая печь для полимеризации покрытия; 3 — ванна со связующим для пленочного покрытия; 4 — резиновая фильера; 5 — диск; 6 — электрические печи для полимеризации связующего; 7 — обмоточное устройство; 8 — фильера; 9 — камера для пропитки связующим; 10 — электрическая печь для удаления замасливателя и влаги; 11 — шпулярник

Стекло- и базальтопластиковую арматуру изготавливают диаметром 3–15 мм, с гладкой поверхностью и периодического профиля. На арматурном стержне периодический профиль

формируют оплеточной нитью, которая вдавливаются в тело стержня с определенным усилием, образуя вмятины глубиной 0,1–0,15 мм. Полученный таким образом периодический профиль арматуры обеспечивает ее достаточное сцепление с бетоном.

Наиболее отработанным способом получения неметаллической арматуры является непрерывная протяжка волокон, пропитанных полимерной композицией. При этом все технологические операции по изготовлению арматуры: пропитка жгута раствором полимерной связующего, удаление инертных растворителей, формирование стержня и его отверждение — непрерывны во времени и взаимосвязаны.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов Ю.М. Технология бетонных и железобетонных изделий / Ю.М. Баженов, А.Г. Комар. — Москва : Стройиздат, 1984. — 672 с.
2. Баженов Ю.М. Бетонополимеры / Ю.М. Баженов. — Москва : Стройиздат, 1983. — 472 с.
3. Материаловедение : учебник / [Арзамасов Б.Н. и др.] ; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. — 2-е изд. — Москва : Машиностроение, 1986. — 384 с.
4. Степанова В.Ф. Арматура композитная полимерная / В.Ф. Степанова, А.Ю. Степанов, Е.П. Жирков. — Москва : Бумажник, 2013. — 200 с.
5. Рабинович Ф.Н. Дисперсно-армированные бетоны / Ф.Н. Рабинович. — Москва : Стройиздат, 1989. — 176 с.
6. Козаченко А.М. Общая технология производства древесных плит : учеб. пособие / А.М. Козаченко, Б.Д. Модлин. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Высшая школа, 1990. — 144 с.
7. Матусевич А.С. Композиционные материалы на металлической основе / А.С. Матусевич. — Минск : Наука и техника, 1978. — 216 с.
8. Наназашвили И.Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции / И.Х. Наназашвили. — 2-е изд., перераб. и доп. — Ленинград : Стройиздат, 1990. — 415 с.
9. Васильев В.В. Композиционные материалы : справочник / В.В. Васильев, Ю.М. Тарнопольский. — Москва : Машиностроение, 1990. — 512 с.
10. Bentur A. Fibre Reinforced Cementitious Composites / A. Bentur, S. Mindess. — London and New York : Taylor and francis group, 2007. — 625 p.
11. Гутников С.И. Стекланные волокна : учеб. пособие / С.И. Гутников, Б.И. Лазорьяк, А.Н. Селезнев. — Москва : МГУ, 2010. — 53 с.
12. Шевченко В.Г. Основы физики полимерных композиционных материалов : учеб. пособие / В.Г. Шевченко. — Москва : МГУ, 2010. — 99 с.
13. Карпинос Д.М. Полимеры и композиционные материалы на их основе в технике / Д.М. Карпинос, В.И. Олейник. — Киев : Наукова думка, 1981. — 180 с.
14. Мельникова Л.В. Технология композиционных материалов из древесины : учебник / Л.В. Мельникова. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : МГУЛ, 2004. — 234 с.
15. Бабаев Ш.Т. Основные принципы получения высокоэффективных вяжущих низкой водопотребности / Ш.Т. Бабаев, Н.Ф. Башлыков, В.Н. Сердюк // Промышленность строительных материалов. Серия 3. Промышленность сборного железобетона. — Москва : ВНИИЭСМ, 1991. — Вып. 2. — С. 12—17.