

## COMPOSITE MATERIALS

M. L. KERBER

*Approaches for creating composite materials based on different types of matrices are considered in this paper. The peculiarities of structure and properties of various types of composite materials in different areas of engineering are evaluated.*

**Обсуждаются подходы к созданию композиционных материалов на базе различных видов матриц. Рассмотрены особенности структуры и свойств различных типов композиционных материалов. Оцениваются перспективы применения композиционных материалов в различных областях техники.**

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

М. Л. КЕРБЕР

Российский химико-технологический университет  
им. Д.И. Менделеева

## ВВЕДЕНИЕ

Знакомство со свойствами многих материалов в окружающем нас мире позволяет говорить об их необычности. Если металлы со свойственной им высокой прочностью и пластичностью, или бетон с его высокой жесткостью и хрупкостью, или пластики с их низкой прочностью и податливостью являются для нас привычными материалами, то имеется значительная группа материалов, поражающая необычным сочетанием свойств разнородных материалов. Так, всем хорошо известный железобетон позволяет сооружать конструкции, выдерживающие большие изгибающие нагрузки (пролеты мостов, балки, оболочки), которые категорически противопоказаны исходному бетону, — он растрескивается при достаточно небольших изгибающих нагрузках.

Если сравнить прочность двух стержней одинакового сечения из древесины и бамбука, то можно убедиться, что бамбук приблизительно в два раза более прочен и гибок. В течение длительного времени эти его особенности использовали при изготовлении шестов для прыжков, для изготовления корабельных мачт и т.д. Необыкновенным сочетанием прочности, жесткости и легкости характеризуются кости животных и человека. Особенно высоки характеристики трубчатых костей птиц, имеющих минимальный вес. Изготовленные из любого из известных материалов подобные изделия имели бы несравненно большую массу. Наконец, изверженная вулканическая лава, обладая химическим составом достаточно хорошо известных горных пород, характеризуется очень низкой плотностью (даже менее единицы) в сочетании с достаточной прочностью и хорошими теплоизоляционными свойствами, предопределяющими возможность применения, например, в строительстве. Такие материалы, сочетающие в себе свойства, присущие порознь нескольким материалам, называются обычно композиционными материалами (КМ).

Как пишет в одной из своих работ профессор МТИ Альберт Дитц, «наука и техника, подобно литературе и искусству, имеют свои модные фразы и штампы. Одним из самых модных в наше время является выражение “композиционные материалы”, содержащее в новой форме очень старую и простую мысль о том, что совместная работа разнородных материалов дает эффект, равносильный созданию нового материала, свойства которого количественно

и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих».

Действительно, история использования человеком композиционных материалов насчитывает много веков, а представление о композиционных материалах заимствовано человеком у природы. Уже на ранних стадиях развития цивилизации человек использовал для строительства кирпич из глины, в которую замешивалась солома, придававшая повышенную прочность. Использование природных битумов позволило повысить водостойкость природных материалов и изготавливать суда из камыша, пропитанного битумом. Прослеживается определенная аналогия между мумификацией умерших с последующей обмоткой тела в виде кокона из полос ткани и современными технологиями обмотки корпусов ракет, между изготовлением боевых луков у кочевников с использованием нескольких слоев из дерева, рога, шелка, скрепляемых с помощью клея, и современными металло-дерево-тканевыми слоистыми конструкциями, соединяемыми отверждающимися смолами. Одним из наиболее ярких примеров такого рода является материал фиберглас из стеклянных волокон, скрепленных полимерным связующим, структура которого повторяет структуру бамбука, где непрерывные волокна из целлюлозы находятся в более пластичной матрице с низким модулем (рис. 1).

Приведенные примеры позволяют выделить то общее, что объединяет композиционные материалы независимо от их происхождения, а именно все эти материалы являются результатом объемного сочетания разнородных компонентов, один из которых пластичен (связующее, матрица), а другой обладает высокой прочностью и жесткостью (наполнитель, арматура), и при этом композиции имеют свойства, которых не имеют отдельные составляющие.

Ясно, что в качестве как первого, так и второго компонента могут выступать самые разнообразные по природе и происхождению материалы. Известны композиты на базе металлов, керамики, стекол, уг-

лерода, пластиков и других материалов. В широком смысле слова практически всякий современный материал представляет собой композицию, поскольку все материалы чрезвычайно редко применяются в чистейшем виде. Это создает определенные сложности с точки зрения использования термина – он распространяется зачастую механически на все сложные системы, содержащие несколько компонентов. Следует подчеркнуть, что наука о композиционных материалах (раздел материаловедения) зародилась недавно, на рубеже 60-х годов, и разрабатывалась главным образом для решения проблемы улучшения механических характеристик и жаростойкости. В последние годы в связи с расширением комплекса свойств, реализуемых с помощью полимерных композиционных материалов, значительно расширились исследования по созданию антифрикционных композиционных материалов медицинского и биологического назначения, газонаполненных композиционных материалов, тепло- и электропроводных КМ, негорючих КМ и др.

В этой связи уместно сказать, что современное определение композиционных материалов предполагает выполнение следующих условий.

1. Композиция должна представлять собой сочетание хотя бы двух разнородных материалов с четкой границей раздела между фазами.
2. Компоненты композиции образуют ее своим объемным сочетанием.
3. Композиция должна обладать свойствами, которых нет ни у одного из ее компонентов в отдельности.

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Существующие композиционные материалы можно разделить на три основных класса, отличающиеся микроструктурой: дисперсно-упрочненные, упрочненные частицами и армированные волокном.

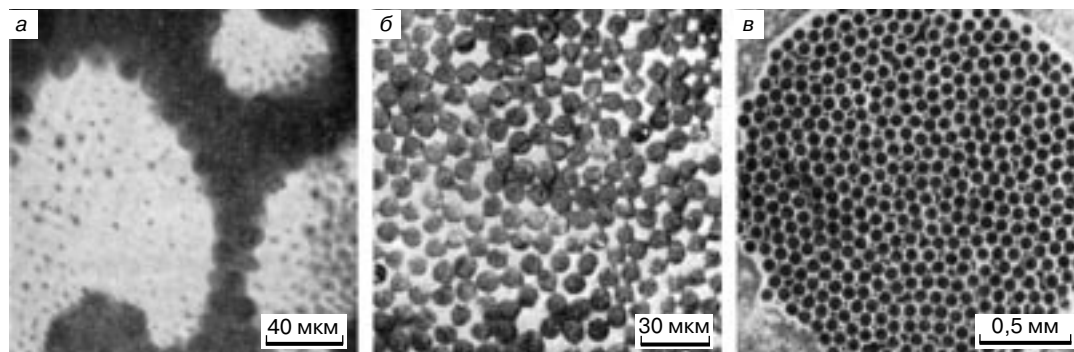


Рис. 1. Микроструктура различных композиционных материалов (сечение поперек армирующих элементов): а – бамбук; б – стеклопластик; в – композит из меди, армированной вольфрамовой проволокой

Все эти материалы представляют собой матрицу из какого-либо вещества или сплава, в которой распределена вторая фаза – обычно более жесткая, чем матрица, которая служит для улучшения того или иного свойства. В основе разделения трех упомянутых классов композиционных материалов лежат особенности их структуры. Для дисперсно-упрочненных композиций характерной является микроструктура, когда в матрице равномерно распределены мельчайшие частицы размером от 0,01 до 0,1 мкм в количестве от 1 до 15 об.%.

В композициях, упрочненных частицами, размер последних превышает 1 мкм, а содержание – 20–25 об.%. Для структуры армированно-упрочненных композитов характерны значительная анизодиаметричность армирующих волокон – их диаметр колеблется от долей микрона до десятков микрон, а длина – от микрон до непрерывных волокон практически неограниченной длины при содержании от нескольких процентов до 70–80 об.%. В последние годы появился еще один класс композиционных материалов – так называемые нанокompозиты, структура которых характеризуется включением второй фазы с размерами в несколько нанометров, содержание которой тоже достаточно невелико.

Существенное повышение некоторых характеристик, которое является важнейшим преимуществом композиционных материалов, на практике привело в настоящее время к относительно широкому применению лишь двух групп материалов на их основе: высокопрочных и жаростойких. Коснемся их немного подробнее.

Природа упрочняющего эффекта в КМ связана с использованием двух материалов с различными прочностью и модулем. Если говорить об упрочняющей роли компонентов КМ, то в общем виде этот эффект следует связать с появлением в материале поверхности раздела фаз и пограничных слоев, прилегающих к ней. Именно более высокие характеристики материала пограничных слоев обеспечивают рост прочностных показателей материала, и именно по этой причине в дисперсно-упрочненных композитах стремятся к использованию тонкодисперсных жестких компонентов, распределенных в более пластичной матрице. В композициях, упрочненных частицами, их содержание достигает больших значений – 40–50% и более. В такой системе реализация наиболее высоких показателей достигается при условии хорошего контакта (смачивания) на поверхности раздела. Вместе с тем возможность химического взаимодействия на поверхности и в пограничном слое, особенно в условиях эксплуатации, нежелательна, так как это может привести к утрате упрочняющего эффекта.

Для достижения максимального упрочняющего эффекта более прочный компонент должен играть роль усиливающей, упрочняющей структуры. Для этого необходимо, чтобы упрочняющие элементы

имели достаточную длину, в этом случае прочность сцепления с матрицей достаточно велика, чтобы они могли выполнить свою основную роль арматуры. Совершенно естественно, что в этом случае наиболее выгодной формой использования армирующей фазы является тонкое волокно: известно, что с уменьшением толщины волокон их прочность заметно возрастает.

Как и в случае дисперсно-упрочненных систем, в волокно-армированных композитах наиболее высокие прочностные характеристики реализуются при высоком содержании армирующих волокон – 65–70% и более. Теоретически на примере полимерных композиционных материалов было показано, что максимальное содержание армирующей фазы составляет около 88–90 об.%. Однако применение непрерывных волокон неограниченной длины далеко не всегда возможно с точки зрения технологической – слишком много ответственных изделий из-за особенностей геометрии не может быть изготовлено из непрерывных волокон, да и не из всех видов материалов удается изготовить непрерывные волокна достаточно большой длины. Было показано, что существует определенная критическая длина волокна, ниже которой упрочняющий эффект падает. Эта длина зависит от модулей и прочности матрицы и волокна, величины адгезии на поверхности и приблизительно в 20 раз больше диаметра волокна. Экспериментальная проверка расчетов осложнена невозможностью получения материала с одинаковой длиной волокон и их строгой ориентацией из-за разрушения волокон в процессе изготовления образцов.

Другое важнейшее направление практического использования КМ – повышение жаропрочности, то есть способности сохранять высокий уровень механических характеристик при повышенных температурах. В этом случае основная опасность, определяющая возможность применения монолитных материалов, – разупрочнение при температурах, значительно уступающих абсолютным температурам плавления (для металлов), или размягчение при температурах, также существенно меньших температуры плавления. Все материалы такого рода могут быть упрочнены волокнами, однако для этого пригодны лишь такие виды волокон, температура плавления которых значительно выше температуры плавления матрицы. Однако и в этом случае далеко не всегда можно использовать комбинацию волокно-матрица. Для всех такого рода материалов необходимо учитывать способность к химическому взаимодействию при высоких температурах, величину деформации при разрушении каждого из компонентов, а также величину времени до разрушения или величину относительного удлинения при разрушении каждого из компонентов в процессе жаропрочных испытаний под нагрузкой.

В табл. 1, 2 приведены характеристики различных матричных материалов для получения волоконных композиционных материалов, а также данные о свойствах наиболее употребительных волокон. Следует подчеркнуть, что для жаропрочных материалов в качестве волокон наибольший интерес представляют собой нитевидные кристаллы различного состава и поликристаллические керамические волокна. Наряду с ними широкое применение находят также металлические волокна (проволоки) из сплавов и благородных металлов (рис. 2).

**Таблица 1.** Свойства армирующих волокон

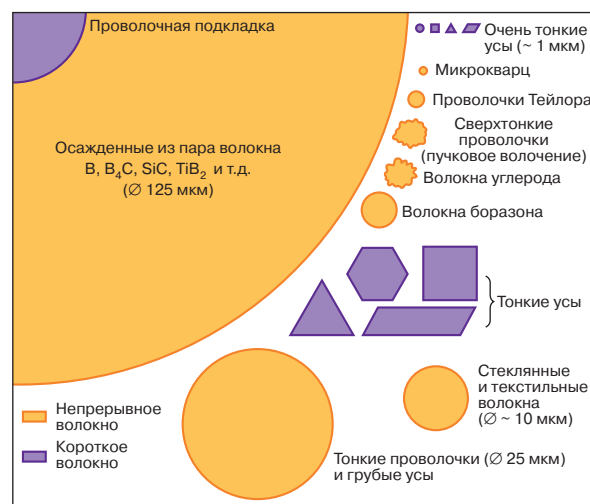
Тип волокон	Температура плавления или размягчения, °С	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Предел прочности при растяжении, кгс/мм <sup>2</sup>	Модуль Юнга × 10 <sup>-3</sup> , кгс/мм <sup>2</sup>	Типичная толщина, мкм
<b>Непрерывные стеклянные</b>					
Е-стекло	700	2,55	350	73,5	10
S-стекло	840	2,50	455	88,2	10
4Н-1	900	2,66	511	101,5	—
SiO <sub>2</sub>	1660	2,19	595	33,2	35
<b>Поликристаллические</b>					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2040	3,15	210	175	—
ZrO <sub>2</sub>	2650	4,84	210	350	—
Углерод/графит	3650	1,50	245	210	5
BN	2980	1,90	140	91	7
<b>Металлические</b>					
W	3400	19,4	406	413	13
Mo	2620	10,2	224	364	25
Рене 41	1350	8,26	203	168	25
Сталь	1400	7,74	420	203	13
Ве	1280	1,83	129	245	127
<b>Усы</b>					
<b>Керамические</b>					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2040	3,96	2100	434	3–10
ВеО	2570	2,85	1330	350	10–30
В <sub>4</sub> С	2450	2,54	1400	490	—
SiC	2690	3,18	2100	490	1–3
Графит	3650	1,66	1991	425	—
<b>Металлические</b>					
Cr	1890	7,20	903	245	—
Cu	1083	8,92	299	126	—
Fe	1540	7,83	1330	203	—
Ni	1455	8,98	392	217	—

**Таблица 2.** Свойства матричных металлов и сплавов

Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность при растяжении, кгс/мм <sup>2</sup>	Модуль Юнга, E × 10 <sup>-3</sup> , кгс/мм <sup>2</sup>
Al термообработанный	2,70	32	7,0
Al отожженный	2,70	13	7,0
Ag	10,5	20	—
Ti + 6Al + 4V	4,43	45	11,3
Cu	8,7	20	1,1

Создание композиционных материалов, армированных нитевидными монокристаллами (“усами”<sup>1</sup>), затруднено необходимостью создания условий для равномерного распределения этих тончайших и весьма хрупких волокон в матрице из металла или керамики. При этом нитевидные волокна должны укладываться определенным образом, чтобы не создавались препятствия для реализации прочности каждого из них.

<sup>1</sup> “Усы” (wiskers) – иглообразные нитевидные высокопрочные монокристаллы металлов, окислов, карбидов и др. с большим отношением длины к диаметру (>20–25). Механические свойства усов близки к теоретически рассчитанным для совершенных кристаллов (см. табл. 1). Кроме собственно усов для армирования используют также вискеризованные волокна – тонкие волокна, поверхность которых покрыта усами относительно небольшой длины.



**Рис. 2.** Относительная площадь и форма сечений некоторых видов армирующих волокон

## ПУТИ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Здесь мы вплотную подходим к важнейшей проблеме создания композиционных материалов — технологии получения материала и изделия из него. При этом надо иметь в виду, что в подавляющем большинстве случаев материал как таковой особого интереса не представляет, так как он не может обрабатываться методами механической обработки — это ведет к утрате им или значительной части, или же всех его преимуществ. Поэтому, как правило, создается технология, ориентированная на изготовление определенных типов изделий: корпусов двигателей, турбинных насадок, профилей переменного сечения.

В зависимости от особенностей свойств матричных материалов разработано значительное число различных технологических приемов, позволяющих изготовить достаточно широкий круг изделий. Подробности таких процессов мало освещаются в научной и технической литературе, так как являются плодом длительных исследований и стоят очень дорого, обеспечивая прорыв в развитии наукоемких оборонных отраслей, таких, как аэрокосмическая, производство вооружений, средств обороны и защиты. Описание некоторых технологических приемов получения КМ описано в [1]. Для иллюстрации многообразия используемых подходов укажем лишь важнейшие из них.

Если исходить из предложенной ранее классификации, то следует начать с так называемых нанокомпозитов, в которых содержание одной из фаз составляет от долей до нескольких процентов, а размеры имеют порядок 10–100 нм. Столь малых размеров частиц удастся достигнуть главным образом в результате химического выделения (чаще всего восстановления) из их соединений с другими элементами, в частности из металлоорганических производных. Совершенно естественно, что в подобных системах об упрочнении не может быть и речи. Вместе с тем введение таких количеств металлов оказывается достаточным, чтобы существенно изменить важные физические свойства, такие, например, как каталитическая активность в химических реакциях, магнитные и электромагнитные свойства. Ограниченный круг материалов, разработка которых пока еще не вышла за лабораторные рамки, не позволяет привести сведения о практических путях их получения.

К группе дисперсно-упрочненных композиций относятся главным образом материалы на основе металлических матриц, где в качестве дисперсных частиц выступают окислы (например,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в медной матрице), а также на основе некоторых силикатных матриц. Из-за близости формы дисперсных частиц к сферической анизотропии свойств в материалах практически не возникает. Основной механизм упрочняющего действия в таких компо-

зиционных материалах связан с повышением сопротивляемости матрицы деформациям под действием нагрузок. Величина возрастания прочностных характеристик относительно невелика. Однако большую ценность этим материалам придает их способность работать при повышенных (по сравнению с металлами) рабочих температурах, превышающих половину абсолютной температуры плавления или фазового превращения. Для композиционных материалов на основе металлических матриц наибольшее распространение получили методы порошковой металлургии, электрохимические, окислением или восстановлением, кристаллизацией из расплава (Mo–TiC). Некоторые из таких композиционных материалов обладают интересными свойствами. Так, композиционный материал на основе меди и окиси бериллия сохраняет более 80% электрической проводимости при комнатной температуре даже после 2000 ч выдержки при 850°C, будучи при этом более прочным, чем медь и ряд ее сплавов. При восстановлении окиси никеля, содержащего дисперсную двуокись тория (3%), получается материал, известный под названием ТД-никель, который обладает значительно более высокой длительной прочностью при температуре 1090°C по сравнению со сверхпрочными сплавами никеля (инконель и хастеллой).

Наиболее многочисленными по количеству и разнообразию свойств являются композиционные материалы, упрочнение которых достигается благодаря использованию частиц или волокон [2, 3]. К первым относятся неорганические порошковые композиции, многочисленные и разнообразные керамические материалы, а также полимерные материалы (термопласты и реактопласты), наполненные разнообразными дисперсными наполнителями (слюдой, тальком, мелом и т.п.). При достаточно высоком содержании дисперсной фазы, достигающем 30–40 об.%, в формировании свойств таких композитов решающее значение приобретают как особенности деформационного поведения каждого из компонентов, так и характер взаимодействия на поверхности раздела фаз. Для изготовления материалов на основе металлических матриц наиболее широкое распространение получили процессы пропитки (Cu–W, Mo–Cu, Ni–Ag), предварительного компактирования смесей порошков с последующим твердофазным (Ag-графит, Cu–Fe) или жидкофазным (W–Ni–Cu, W–Ni–Fe, Ti–SiC–Ni) спеканием.

В основе получения таких материалов на базе керамических матриц лежит процесс изменения фазового состояния многочисленных систем в результате образования центров кристаллизации и роста кристаллов, роста зерен, твердо- и жидкофазного спекания. Подбором соответствующих условий нагрева, термообработки, отжига можно регулировать изменения структуры и свойств керамических композиционных материалов в широких пределах.

Основные преимущества их связаны с высокими температурами эксплуатации (что характерно для керамики) при одновременном значительном повышении прочностных свойств. Материалы на керамических матрицах готовятся путем смешения компонентов в различных установках с последующим формованием заготовок путем уплотнения, литья и др. Однако важнейшим этапом формирования структуры таких материалов является термическая обработка, часто весьма продолжительная. При использовании полимерных матриц основной путь — это интенсивное смешение в расплаве с последующей грануляцией.

В упрочненных частицами КМ коэффициент возрастания прочности достаточно велик (от 2 до 25), а высокотемпературная стабильность зависит от характера изменения свойств дисперсной фазы при высоких температурах. Как и в случае дисперсно-упрочненных материалов, их свойства, как правило, изотропны; появление анизотропии может быть связано с вытянутой формой частиц некоторых дисперсных материалов. В связи с ростом поверхности раздела в формировании прочностных свойств существенно возрастает роль межфазного взаимодействия. Основной эффект повышения прочности в этих КМ достигается в результате уменьшения способности к пластической деформации относительно более подвижной матрицы, при этом прочность возрастает с уменьшением доли матрицы.

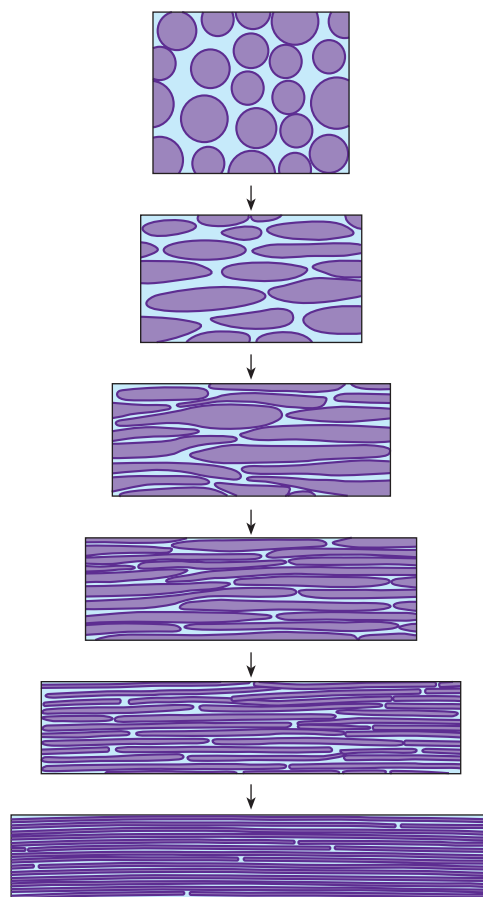
Наиболее обширную и разнообразную по своему составу группу составляют КМ, армированные волокнами. Это объясняется тем, что в композитах этого типа удастся реализовать наиболее высокие прочностные и термические характеристики, так как именно использование волокон дает наибольший упрочняющий эффект. Для этой группы КМ и теоретические представления разработаны наиболее полно, и практическая реализация, несмотря на очень значительные технологические трудности, продвинута наиболее существенно.

Не касаясь материалов на основе углеродных матриц, где работы еще только начинают разворачиваться, и полимерных композитов, свойства которых подробно описаны в одной из статей, уже опубликованной в “Соросовском Образовательном Журнале” [4], ограничимся тремя важнейшими видами таких КМ.

К числу наиболее универсальных видов КМ следует отнести армированные волокнами металлы — они позволяют существенно повысить и прочность, и жаростойкость. Для эффективного упрочнения волокно должно быть прочнее и жестче матрицы, которая в этом случае передает нагрузку на более прочное волокно. Используемые для этих целей волокна в значительной степени определяют возможные методы получения КМ и изделий из них: керамические волокна и волокна из окислов (усы окислов, боридов, карбидов, нитридов) из-за высо-

кой хрупкости не допускают пластического деформирования матрицы, тогда как более пластичные волокна и усы из металлов допускают возможность переформирования заготовок. Из-за плохого смачивания металлами и с целью уменьшения опасности преждевременного разрушения керамические волокна и усы иногда покрывают пленкой из металла (через расплав или из газовой фазы). Как уже отмечалось, использование очень тонких волокон и усов позволяет достигать наиболее высоких показателей прочности КМ, однако необходимость предотвращения из разрушения на всех промежуточных стадиях и придания им ориентации создает очень большие трудности в технологическом плане.

Как правило, все процессы включают предварительное получение заготовок, которые потом превращаются в изделия или полуфабрикаты путем их опрессовки, прокатки, протяжки через фильеру, диффузионной сварки и др. К числу наиболее освоенных методов их получения относятся пропитка



**Рис. 3.** Последовательные стадии превращения сферических частиц армирующей фазы в волокна в процессе деформирования (например, при экструзии или прокатке)

пучков волокон расплавами металлов, электроосаждение (или осаждение из паров), смешение с порошком металла (с последующим прессованием или спеканием) (рис. 3).

Для получения слоистых заготовок иногда волокон (особенно непрерывные) наматывают на оправку, укладывают в специальные канавки в фольге, скрепляют летучим клеем – с последующей горячей прокаткой или прессованием. При этом удается достигнуть высоких значений прочности и работоспособности при повышенных температурах. Так, в композите из серебра с 24% усов  $Al_2O_3$  предел текучести ( $162 \text{ кг/мм}^2$ ) в 30 раз превышает предел текучести серебра и в два раза выше этого показателя у других упрочненных материалов на основе серебра. Этот же материал при температуре на  $20^\circ\text{C}$  ниже температуры плавления серебра сохраняет прочность  $58 \text{ кгс/мм}^2$ , что соответствует нагрузке на усы в пределах 40–60% их прочности.

В настоящее время описан достаточно широкий круг таких материалов на алюминиевых, титановых, железных, нихромовых и других матрицах с использованием как металлических, так и оксидных армирующих волокон (табл. 3, 4). Для оценки ожидаемой прочности таких КМ широко используется уравнение смесей ( $\sigma_{\text{КМ}}$ ,  $\sigma_{\text{вол}}$ ,  $\sigma_{\text{м}}$  – прочности соответственно композиционного материала, волокон, матрицы;  $V_{\text{вол}}$ ,  $V_{\text{м}}$  – объемные доли волокон и матрицы)

$$\sigma_{\text{КМ}} = \sigma_{\text{вол}} V_{\text{вол}} + \sigma_{\text{м}} V_{\text{м}}$$

Однако это правомерно для случая непрерывных волокон. В случае коротких волокон имеют место отклонения, даже если средняя длина волокон выше критической (обычно  $l/d \geq 20$ ). Это связано с недостаточным сцеплением с матрицей, разбросом в длинах волокон, неоднородностью в ориентации волокон. Поэтому даже при  $l/d = 400$  не удается достигнуть прочностных показателей КМ с непрерывными волокнами.

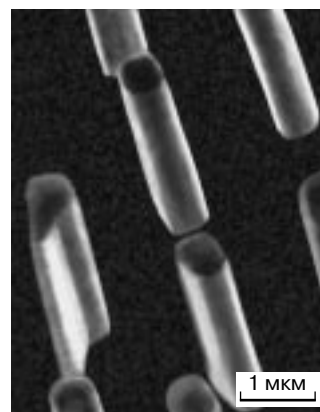
Вторым видом волоконупрочненных КМ с металлической матрицей являются направленно-кристаллизованные эвтектические сплавы. При охлаждении жидкостей определенного состава может идти кристаллизация с образованием двух фаз. Если при этом удается создать плоский фронт кристаллизации, то возникает упорядоченная ориентированная микроструктура. Практически это один из путей формирования нитевидных кристаллов (типа усов) непосредственно в матрице. Такие композиты получены, в частности, из меди и хрома, алюминия и никеля, меди и вольфрама. В последнем случае была достигнута прочность  $175 \text{ кг/мм}^2$ . Металлографические исследования показали, что процесс разрушения в таких композитах начинается с разрушения усов – это свидетельствует о высокой прочности связи на поверхности раздела.

**Таблица 3.** Свойства некоторых армированных волокнами металлов

Матрица	Волокно	Содержание волокна, %	Прочность при растяжении, кгс/мм <sup>2</sup>	Прочность/плотность $\sigma/\rho$ , 10 км
Al	SiO <sub>2</sub>	47	91	3,75
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35	112,7	3,55
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10	3,6	1,17
	B	10	30,1	1,13
	B <sub>4</sub> C	10	20,3	0,76
Ni	B	8	268,8	3,67
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	19	119,7	1,50
	W	40	112,7	0,86
Ag	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	24	162,4	0,18
	Si <sub>3</sub> O <sub>4</sub> *	15	28,0	0,03
	Mo*	20	67,2	0,11
Cu	W	77	178,5	0,10

\* Короткие волокна или усы.

Для эвтектического сплава Ni–NbC (11 об.%) средняя прочность волокон  $586 \text{ кгс/мм}^2$ , эти же волокна, выделенные путем растворения матрицы, обладали прочностью  $1030 \text{ кгс/мм}^2$ , что свидетельствует о высоком совершенстве нитевидных кристаллов, формирующихся в процессе направленной кристаллизации эвтектики (рис. 4). К преимуществам таких КМ следует отнести простоту их изго-



**Рис. 4.** Торец направленно-кристаллизованного эвтектического сплава TaC–(Co + Ni–Cr), протравленный после кристаллизации. Видны монокристаллические нитевидные волокна TaC

**Таблица 4.** Свойства композиционных материалов с матрицей Ti + 6Al + 4V, армированных бериллиевой проволокой

Способ получения КМ	Проволока			Композиционный материал		
	состав	диаметр	прочность, кгс/мм <sup>2</sup>	состав волокна в КМ	прочность КМ, кгс/мм <sup>2</sup>	модуль Юнга $E \times 10^{-6}$ , кгс/мм <sup>2</sup>
Горячее вакуумное прессование						
проволока + лист	Хим. чист.	1,5	65	50	70	19,5
проволока и фольга	Хим. чист.	1,5	65	50	81	21,2
проволока и фольга	Металл + 0,2% BeO	0,5	98	43	94	18,4
Совместная экструзия и прокатка	То же	0,95	60	38	81	17,2
Совместная экструзия	То же	0,95	60	0	77	18,3

товления – нет необходимости отдельного изготовления усов, исчезают трудности, связанные с их использованием. Высокие значения прочности связи на поверхности раздела, отсутствие окисных слоев обеспечивают высокую термическую устойчивость – возможность длительной работы при повышенных температурах. Однако для таких КМ характерно постоянство объемной доли эвтектической фазы, что делает невозможным воздействие на свойства путем изменения состава. Кроме того, для реализации плоского фронта кристаллизации необходимо использовать высокочистые вещества, так как примеси этому препятствуют.

Наконец, несколько слов следует сказать о КМ на основе керамики, армированной волокнами. Керамика характеризуется низкой прочностью при растяжении в сочетании с высоким модулем Юнга, низкой ударной вязкостью. При высоких температурах одной из причин выхода из строя изделий из керамики является растрескивание. Это создает большие трудности при армировании ее волокнами, поскольку недостаточное удлинение матрицы препятствует передаче нагрузки на волокно. Поэтому волокна должны иметь еще более высокий модуль, чем матрица. Ассортимент таких волокон ограничен, поэтому в этих целях часто используют металлические волокна. Как и предполагалось, сопротивление растяжению растет при этом незначительно, но существенно повышается сопротивление тепловым ударам. При этом в зависимости от соотношения коэффициента термического расширения матрицы и волокна возможны случаи, когда прочность падает [5].

Материалы такого рода готовятся методами горячего прессования (таблетирование с последующим спеканием под давлением) или методом шликерного литья, когда волокна заливаются суспензией матричного материала, которая после сушки также подвергается спеканию.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные примеры композиционных материалов на различных матрицах свидетельствуют о возможности реализации в них чрезвычайно интересных сочетаний важнейших эксплуатационных характеристик – высокой прочности, включая диапазон высоких температур, жаростойкости, усталостной прочности и др. Уже сейчас на керамических матрицах рабочие температуры могут достигать 1600°C, на металлических – до 1370°C. Увеличение рабочих температур в двигателях приводит к уменьшению их размеров, росту мощности и снижению стоимости эксплуатации. Вместе с тем, как это видно из данных табл. 3, применение для армирования таких волокнистых материалов, как углеродное волокно, окисные волокна и усы, карбиды и другие материалы с низкой плотностью, позволяет реализовать в композитах значительное снижение массы деталей при сохранении ими неизменной прочности. Это предопределило тот факт, что наибольшие успехи в практическом использовании КМ достигнуты в аэрокосмической технике (сопловые блоки ракет, носовые конуса), производстве газотурбинных двигателей (лопатки турбин), вертолетостроении. Уже сейчас КМ широко применяются в строительстве скоростных автомобилей, корпусов экстремальных яхт и гоночных судов, спортивного инвентаря и т.п. В настоящее время важнейшими факторами, сдерживающими применение большинства КМ, являются высокая стоимость армирующих волокон, в первую очередь нитевидных монокристаллов, а также серьезные проблемы технологического характера, затрудняющие высокую степень реализации прочности армирующих волокон в деталях из композиционных материалов.

Поэтому основные усилия исследователей и производителей направлены на разработку эффективных, технологичных и экономичных методов получения армирующих волокон, а также на совершенствование технологических процессов изготовления материалов и изделий. Успешное решение этих проблем позволит надеяться, что преимущест-



ва, связанные с использованием КМ, будут успешно реализованы в самом широком ассортименте изделий, с которыми нам приходится иметь дело постоянно.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волоконные композиционные материалы: Пер. с англ. / Под ред. Дж. Уиктна, Э. Скала. М.: Металлургия, 1978. 240 с.
2. Современные композиционные материалы: Пер. с англ. / Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. М.: Мир, 1970. 672 с.
3. Углеродные волокна и углекомпозиаты: Пер. с англ. / Под ред. Э. Фитцера. М.: Мир, 1988. 336 с.
4. Берлин Ал.Ал. Современные полимерные композиционные материалы (ПКМ) // Соросовский Образовательный Журнал. 1995. № 1. С. 57–65.
5. Справочник по композиционным материалам: В 2 кн.: Пер. с англ. / Под ред. Дж. Любина. М.: Машиностроение, 1988. Кн. 1. 448 с.; Кн. 2. 584 с.

6. Достижения в области композиционных материалов: Пер. с англ. / Под ред. Дж. Пиатти. М.: Металлургия, 1982. 304 с.

7. Цирлин Н.К. Непрерывные неорганические волокна для композиционных материалов. М.: Металлургия, 1992. 206 с.

\* \* \*

Михаил Леонидович Кербер, доктор химических наук, профессор кафедры технологии переработки пластмасс факультета химической технологии полимеров Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева. Область научных интересов – физическая химия полимеров и композиционных материалов, разработка новых полимерных материалов и новых методов их переработки. Автор более 300 статей и изобретений, одной монографии и пяти учебных пособий.