

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ**

Лекция 5

План:

- 1. Общая характеристика методов получения композитов с металлической матрицей
- 2. Классификация методов получения и обработки композитов с металлической матрицей
- 3. Технологические процессы получения и обработки металлических композиционных материалов
- 4. Примеры КММ

Общая характеристика методов получения композитов с металлической матрицей

-
- Металлические композиционные материалы изготавливают:
 - -твердофазными методами;
 - -жидкофазными методами;
 - -методами осаждения – напыления;
 - -возможны также комбинированные методы.

Общая характеристика методов получения композитов с металлической матрицей

- *Твердофазные методы* характеризуются использованием матрицы в твердом состоянии, преимущественно в виде порошка, фольги или компактного металла.
- *Жидкофазные методы* предусматривают получение металлических композитов путем совмещения армирующих волокон с расплавленной матрицей . К ним относят методы пропитки волокон жидкими матричными сплавами и метод направленной кристаллизации.
- При *методах осаждения - напыления* матричный металл наносят на волокна из растворов солей или других химических соединений, из парогазовой фазы, с помощью плазмы и т.д.
- *Комбинированные методы* представляют собой последовательное или параллельное применение первых трех методов. Волокна в большинстве случаев вводят в металлический композит в твердофазном состоянии за исключением эвтектических композиционных материалов, в которых армирующая фаза (волокна и пластины) образуется из расплава в процессе направленной кристаллизации эвтектик.
- *Выбор метода получения композита с металлической матрицей зависит от вида исходных компонентов, возможности введения армирующей фазы без повреждения, обеспечения прочной связи между компонентами, равномерного распределения армирующих элементов в матрице. Учет этих факторов обеспечивает максимальную реализацию свойств арматуры и матрицы*

Классификация методов получения и обработки композитов с металлической матрицей

- Методы получения и обработки композиционных материалов с металлической матрицей более детально можно подразделить на:
 - химические (химического осаждения) и электрохимические (гальванические);
 - газо- и парофазные (*вакуумное осаждение паров, газотермическое нанесение покрытий: плазменные, газопламенные, электродуговые, высокочастотные*) ;
 - -жидкофазные (*направленная кристаллизация, протягивание жгутов и волокон через расплав, пропитка жгутов и каркасов волокон: вакуумная, компрессионная, при нормальном давлении, вакуумно-компрессионная*);
 - -твердофазные (*импульсные: сварка взрывом, магнитно-импульсное компактирование, гидроимпульсное компактирование, электроимпульсное компактирование; статические: диффузионная сварка, гидростатическое компактирование, спекание под давлением, изо-статическое компактирование, термокомпрессионное компактирование, прессование, статическая формовка; динамические: прокатка, волочение, динамическое горячее прессование, роликовая формовка, вальцовочная формовка, плазменное напыление и др*).

Технологические процессы получения и обработки металлических композиционных материалов

- **При получении металлических композитов используются следующие технологические процессы:**
- обработка давлением,
- процессы порошковой металлургии,
- процессы пропитки и направленной кристаллизации,
- процессы осаждения - напыления.

1.Обработка давлением

В результате этого процесса можно получать металлические композиты с матрицей из деформируемых металлов и сплавов:

- компактной (листы, слои, фольги, прутки, трубы, проволока),
- пористой (слои, полученные методом осаждения-напыления) формы.

В качестве арматуры используют

- пластичные,
- хрупкие волокна.

Главным преимуществом получения обработкой давлением является отсутствие вредного взаимодействия между волокнами и матрицей при ограниченном времени их контакта.

Главным недостатком -возможность повреждения волокон , особенно хрупких или малопластичных, вследствие высоких напряжений, возникающих при больших пластических деформациях.

Режимы процесса уплотнения например, температура, давление, степень и направление деформации, количество проходов выбираются так, чтобы совместная пластическая деформация компонентов композита не приводила **к разрушению арматуры**, а на границе волокно - матрица **возникла прочная связь**.

При использовании волокон или проволоки со значительным запасом пластичности применимы практически все методы уплотнения:

- -прокатка,
- -импульсное прессование с помощью взрыва или ударной нагрузки,
- -гидроэкструзия и др.

В случае армирования металлов хрупкими или малопластичными волокнами чаще всего применяют процессы, при которых степень пластической деформации невысока, например, диффузионную сварку или прокатку с малыми единичными обжатиями.

Процессы порошковой металлургии



- В этих процессах используется матрица в виде порошка.
- Армирующими элементами могут быть нитевидные кристаллы, непрерывные и дискретные волокна, сетки и ткани из волокон.

Схема технологического процесса получения МВКМ методами порошковой

Преимущества метода:

- возможность использования в качестве матрицы трудно деформируемых металлов, сплавов, соединений,
- достижение высоких концентраций армирующей фазы,
- обеспечение в случае необходимости сочетания армирования с дисперсным упрочнением,
- использование оборудования, существенно не отличающегося от обычно применяемого в порошковой металлургии.

Недостатки –

- неравномерность распределения коротких волокон по объему изделия из-за комкования в ходе перемешивания шихты с волокнами,
- возможность повреждения хрупких волокон при смешивании, уплотнении или деформации МВКМ,
- повышенное содержание оксидов и других примесей из-за развитой поверхности матричных порошков.

Трудности связаны с высокими температурами, при которых происходит пропитка арматуры металлическим расплавом.

- При высоких температурах протекают химические реакции на поверхности армирующих элементов. Если химическая реакция затрагивает тонкий граничный слой, то это упрочняет связь армирующего элемента с матрицей, но если слой утолщается, то продукты реакции могут сильно ослабить связь и даже вызвать разрушение. *Отсюда следует актуальная научная физико-химическая проблема изучения реакций на межфазных границах*

Низкотемпературные методы изготовления композитов с металлической матрицей

В настоящее время разрабатывается ряд низкотемпературных способов изготовления композитов с металлической матрицей.

- Все они прямо или косвенно основаны на диффузионном связывании.
- При прямом диффузионном связывании используют нанесение фольги или порошка металла на волокно и нагрев при температурах ниже температуры плавления металла.

В ряде случаев более эффективно диффузионное связывание происходит при *высоких давлениях*.

- Этот способ применяют, *например*, при изготовлении композитов из Al или Mg - матриц с волокнами из бора или углерода.

Однако и в этих случаях протекают *поверхностные реакции*, что указывает на необходимость изучения реакций на межфазных границах не только при температурах плавления металла, а в более широком интервале температур.

Примером непрямого диффузионного связывания (хотя это определение и не точно) является способ *лазерного воздействия на композит*.

Металлические волокнистые композиционные материалы (МВКМ)

- Армирование металлов высокопрочными и высокомодульными волокнами и дисперсными частицами позволяет улучшить комплекс их физико-механических характеристик: *повысить предел прочности, предел текучести, модуль упругости, предел выносливости, расширить температурный интервал эксплуатации.*

У волокнистых композитов матрица, чаще всего пластичная, армирована:

1. высокопрочными волокнами,
2. проволокой,
3. нитевидными кристаллами.

- Идея создания волокнисто-армированных структур состоит не в том, чтобы исключить пластическое деформирование матричного материала, а в том, чтобы при его деформации обеспечивалось нагружение волокон и использовалось бы их высокая прочность.
- Механические свойства высокопрочных материалов определяются наличием *поверхностных дефектов* (разрезов, трещин и т.д.).
- *Около вершин этих дефектов при нагружении концентрируются внутренние напряжения, которые зависят от внешнего приложенного напряжения, глубины трещины и радиуса кривизны в вершине трещины. Для хрупких материалов коэффициент концентрации напряжений равен $K_{KH} = 10^2-10^3$. В этом случае при действии уже относительно небольших средних напряжений у кончика трещины растягивающие напряжения достигают предельных значений и материал разрушается.*

- Существует **критическая длина трещины**, при которой проявляется тенденция к ее неограниченному росту, приводящая к разрушению материала.
- *Важен тот факт, что соответствующее критическое напряжение зависит от абсолютного размера трещины. Из хрупких веществ материал с высокой воспроизводимой прочностью можно получать в основном в виде волокон. Это обусловлено тем, что волокна намного менее чувствительны к имеющимся в них дефектам, чем монолитные изделия. Из-за геометрии волокна трещины в них должны быть либо короткими, либо они должны быть преимущественно параллельны продольной оси волокон и, следовательно, относительно безопасные.*
- *Изделие с высокой прочностью (например, канат) может быть в принципе получено путем объединения параллельных волокон, расположенных должным образом в пространстве. В канате волокна нагружаются в основном растягивающими напряжениями. При объединении волокон в изделие (путем соответствующих навивок) напряжения между отдельными волокнами создаются вследствие трения скольжения, возникающего при растяжении каната.*
- *При изготовлении и в процессе эксплуатации канатов (ВКМ) волокна в них подвергаются изгибам, взаимному трению, что приводит к падению прочности волокон, а иногда к невозможности использования их. Например, высокопрочные волокна (стеклянные, углеродные, борные) очень чувствительны к поверхностным повреждениям их нельзя применять в канатах, не использовав среду, которая защитила бы поверхность волокон и связала их воедино. Такой средой может быть полимерный материал или пластичный металл.*
- *Когда используются не непрерывные волокна (как в канатах), а объединяются связующим короткие (прерывистые, дискретные) волокна, то и в этом случае сохраняется принцип волокнистого армирования. Он состоит в том, что при нагружении композита на границе раздела матрицы с волокном возникают касательные напряжения, которые приводят к полному нагружению волокон.*
- *Особенность волокнистой композиционной структуры заключается в равномерном распределении высокопрочных, высокомодульных волокон в пластичной матрице (содержание их, т.е. объемная доля, может достигать 75% об).*

Характеристика волокнистых КМ

Механические свойства ВКМ определяются тремя основными параметрами:

1. высокой прочностью армирующих волокон,
 2. жесткостью матрицы,
 3. прочностью связи на границе матрица-волокно.
- Соотношение этих трех параметров характеризуют весь комплекс механических свойств материала и механизм его разрушения.
 - Работоспособность ВКМ обеспечивается как правильным выбором исходных компонентов, так и рациональной технологией производства, обеспечивающей прочную связь между компонентами при сохранении первоначальных свойств.

Армирующие волокна

- Армирующие волокна, применяемые в конструкционных композитах, должны удовлетворять комплексу эксплуатационных и технологических требований.
- К первым относятся требования **по прочности, жесткости, плотности, стабильности свойств в определенном температурном интервале, химической стойкости и т.д.**
 - Теоретическая прочность материалов возрастает с увеличением модуля упругости и поверхностной энергии вещества и падает с увеличением расстояния между соседними атомными плоскостями.
 - Следовательно, высокопрочные твердые тела должны иметь высокие модуль упругости и поверхностную энергию и возможно большее число атомов в единице объема.
 - Этим требованиям удовлетворяют Be, B, C, N₂, O₂, Al и Si (7 элементов, самых легких, самых верхних в периодической системе). Наиболее прочные материалы всегда содержат один из этих элементов, а зачастую состоят только из указанных элементов.
 - При создании ВКМ применяются высокопрочные стеклянные, углеродные, борные и органические волокна, металлические проволоки, а также волокна и нитевидные кристаллы ряда карбидов, оксидов, нитридов и других соединений (SiC, SiO₂, Al₂O₃, Si₃N₄,).
- **Технологичность волокон** определяет возможность создания высокопроизводительного процесса изготовления изделий на их основе.
 - Важным требованием является также совместимость волокон с материалом матрицы, т.е. возможность достижения прочной связи волокно-матрица при условиях, обеспечивающих сохранение исходных значений механических свойств компонентов.
 - *Примеры ВКМ* Mg-B(волокна), Mg-C(волокна), Mg-стальные волокна, Ti - Mo(волокна), Ti -B; Ti -SiC; Ti - Be, Ni -Al₂O₃ и др.

Основные виды композитов на основе металлической матрицы.

Свойства, методы получения и области применения

- По структуре и геометрии армирования композиты на основе металлической матрицы могут быть в виде
- волокнистых (МВКМ),
- дисперсно-упрочненных (ДКМ),
- псевдо- и эвтектических сплавов (ЭКМ),

В качестве материала основы наиболее широко применяют такие металлы как Al, Mg, Ti, Ni, Co.

Металлические волокнистые композиционные материалы на различной основе

Свойства и методы получения МВКМ на основе алюминия

Свойства и методы получения МВКМ на основе магния

Свойства и методы получения МВКМ на основе титана

Области применения МВКМ

- Композиционные волокнистые материалы с металлической матрицей применяют при низких, высоких и сверхвысоких температурах, в агрессивных средах, при статических, циклических, ударных, вибрационных и других нагрузках. Наиболее эффективно используются МВКМ в конструкциях, особые условия, работы которых не допускают применения традиционных металлических материалов. Однако чаще всего в настоящее время армированием металлов волокнами стремятся улучшить свойства матричного металла, чтобы повысить рабочие параметры тех конструкций, в которых до этого использовали неармированные материалы. Использование МВКМ на основе алюминия в конструкциях летательных аппаратов, благодаря их высокой удельной прочности, позволяет достичь важного эффекта - снижения массы. Замена традиционных материалов на МВКМ в основных деталях и узлах самолетов, вертолетов и космических аппаратов уменьшает массу изделия на 20 - 60%.
- Наиболее актуальна в газотурбостроении задача повышения термодинамического цикла энергетических установок. Даже малое повышение температуры перед турбиной значительно увеличивает КПД газотурбинного двигателя. Обеспечить работу газовой турбины без охлаждения или, по крайней мере, с охлаждением, не требующим большие
- конструктивных усложнений газотурбинного двигателя, можно используя высокожаропрочные МВКМ на основе никеля и хрома, армированные волокнами Al_2O_3 .
- Алюминиевый сплав, армированный стекловолокном, содержащим оксид урана, обладает повышенной прочностью при температуре 823К и может быть использован в качестве топливных пластин ядерных реакторов в энергетике.

- Металлические волокнистые композиты используют в качестве уплотнительных материалов. Например, статические уплотнения, изготовленные из Мо или стальных волокон, пропитанных медью или серебром, выдерживают давление 3200 МПа при температуре 923К.

- Как износостойкий материал в коробках передач, дисковых муфтах, пусковых

- устройствах можно использовать МВКМ, армированные "усами" и волокнами. В таб.1 представлены прочностные свойства ряда армированных волокнами металлов.

- Области применения МВКМ определяются не только механическими, но и физическими свойствами - электрическими, магнитными, ядерными, акустическими и др.

В армированных W-проволокой магнитотвердых материалах удается сочетать магнитные свойства с высоким сопротивлением ударным нагрузкам и вибрациям. Введение арматуры из W, Мо в медную и серебряную матрицу позволяет получать износостойкие электрические контакты, предназначенные для сверхмощных высоковольтных выключателей, в которых сочетаются высокие тепло- и электропроводность с повышенным сопротивлением износу и эрозии.

- Принцип армирования можно положить в основу создания сверхпроводников,

- когда в матрицах из Al, Cu, Ti, Ni создают каркас из волокон сплавов, обладающих сверхпроводимостью, например, Nb - Sn, Nb -Zr. Такой сверхпроводящий композит может передавать ток плотностью $10^5 - 10^7$ А/см².

Свойства некоторых армированных волокнами металлов

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

* Короткие волокна или "усы".