

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Общая характеристика методов получения композитов с металлической матрицей

Металлические композиционные материалы изготавливают:

- твердофазными методами;
- жидкофазными методами;
- методами осаждения – напыления;
- возможны также комбинированные методы.

Для *твердофазных методов* характерно использование 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 получении металлических композитов *методами 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 преимущественно следующие технологические процессы: обработка давлением, процессы порошковой металлургии, процессы пропитки и направленной кристаллизации, процессы осаждения - напыления.

Обработка давлением

В результате этого процесса можно получать металлические композиты матрицей из деформируемых металлов и сплавов, как компактной (листы, слои, фольги, прутки, трубы, проволока), так и пористой (слои, полученные методом осаждения-напыления) формы. В качестве арматуры используют как пластичные, так и хрупкие волокна. Главным преимуществом получения МВКМ обработкой давлением является отсутствие вредного взаимодействия между волокнами и матрицей при ограниченном времени их контакта, а главным недостатком - возможность повреждения волокон, особенно хрупких или малопластичных, вследствие высоких напряжений, возникающих при больших пластических деформациях. Режимы процесса уплотнения МВКМ, например, температура, давление, степень и направление деформации, количество проходов должны быть выбраны так, чтобы совместная пластическая деформация компонентов композита не приводила к разрушению арматуры, а на границе волокно - матрица возникала 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, дисперсные частицы и др. (рис. 1).



Рис. 1.Схема технологического процесса получения МВКМ методами порошковой металлургии

Преимуществами метода являются возможность использования в качестве матрицы труднодеформируемых 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.

Низкотемпературные методы изготовления композитов с металлической матрицей

Способы изготовления композитов с металлической матрицей весьма разнообразны. 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.

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 $K_{КН} = 10^2-10^3$. 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 и 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 m возрастает с увеличением модуля упругости E и поверхностной энергии вещества и падает с увеличением расстояния a_0 между соседними атомными плоскостями a_0 . 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

Как отмечалось, по структуре и геометрии армирования композиты на основе металлической матрицы могут быть в виде волокнистых (МВКМ), дисперсно-упрочненных (ДКМ), псевдо- и эвтектических сплавов (ЭКМ), а в качестве материала основы наиболее широко применяют такие металлы как Al, Mg, Ti, Ni, Co.

Металлические волокнистые композиционные материалы на азличной основе

Свойства и методы получения МВКМ на основе алюминия

МВКМ А 1 - стальные волокна. При получении заготовок, состоящих из чередующихся слоев алюминиевой фольги и волокон, чаще всего применяют прокатку, динамическое горячее прессование, сварку взрывом, диффузионную сварку. Прочность этого типа композита в основном определяется прочностью волокон. Введение в Al матрицу высокопрочных стальных проволок повышает предел выносливости композита.

МВКМ А1 - кремнеземные волокна получают, пропуская волокна через расплав матрицы с последующим горячим прессованием. Скорость ползучести этих МВКМ при температурах 473 - 573К на два порядка ниже ползучести неармированной матрицы. Композиты Al-SiO₂ обладают хорошей демпфирующей способностью.

МВКМ А1 - борные волокна относятся к наиболее перспективным конструкционным материалам, поскольку обладают высокими прочностью и жесткостью при температурах до 673 - 773 К. При изготовлении широко используется диффузионная сварка . Жидкофазные методы (пропитка, различные виды литья и др.), ввиду возможности взаимодействия бора с алюминием, применяют лишь в тех случаях когда на волокна бора предварительно нанесены защитные покрытия - карбид кремния (волокна борсик) или нитрид бора.

МВКМ А1 - углеродные волокна имеют высокие показатели прочности и жесткости при малой плотности. Однако большой недостаток углеродных волокон - их нетехнологичность, связанная с хрупкостью волокон и их высокой реакционной способностью. Обычно МКМ А1-углеродные волокна получают пропиткой жидким металлом или методом порошковой металлургии. Пропитку используют при армировании

непрерывными волокнами, а методы порошковой металлургии - при армировании дискретными волокнами.

Свойства и методы получения МВКМ на основе магния

Использование магния и магниевых сплавов в качестве матрицы, армированной высокопрочными и высокомодульными волокнами, позволяет создать легкие конструкционные материалы с повышенными удельной прочностью, жаропрочностью и модулем упругости.

МВКМ Mg - борные волокна отличается высокими прочностными свойствами. Бор не растворяется в жидком магнии. Для изготовления МКМ можно применять методы пропитки и литья. Листовые композиции Mg-B изготавливают методом диффузионной сварки. Недостатком МКМ Mg-B является пониженная коррозионная стойкость.

МВКМ Mg - углеродные волокна получают пропиткой или горячим прессованием в присутствии жидкой фазы, растворимость углерода в магнии отсутствует. Для улучшения смачивания углеродных волокон жидким магнием их предварительно покрывают титаном (путем плазменного или вакуумного напыления), никелем (электролитически) или комбинированным покрытием Ni -B (химическим осаждением).

Свойства и методы получения МВКМ на основе титана

Армирование титана и его сплавов повышает жесткость и расширяет диапазон рабочих температур до 973 - 1073К. Для армирования титановой матрицы применяют металлические проволоки, а также волокна карбидов кремния и бора. Композиты на основе титана с металлическими волокнами получают прокаткой, динамическим горячим прессованием и сваркой взрывом.

МВКМ Ti - Mo (волокна) получают методом динамического горячего прессования заготовок типа "сэндвич" в вакуумированных контейнерах. Такое армирование позволяет повысить длительную прочность по сравнению с матрицей и сохранить прочность при высоких температурах. Одним из недостатков МВКМ Ti - Mo является высокая плотность, что снижает удельную прочность этих материалов.

МВКМ Ti-B, SiC (волокна) имеют повышенные не только абсолютные, но и удельные характеристики МВКМ на основе титана. Так как эти волокна хрупки, то для получения компактных композиций чаще всего используют диффузионную сварку в вакууме. Длительные выдержки МВКМ Ti-B при температурах выше 1073 К под давлением приводят к образованию хрупких боридов титана, разупрочняющих композит. Карбидокремниевые волокна более устойчивы в матрице. Композиты Ti-B обладают высокой кратковременной и длительной прочностью. Чтобы повысить термическую стабильность волокон бора их покрывают карбидом кремния (борсик). Композиты Ti-SiC

имеют высокие значения внеосевой прочности и предела ползучести.

В системе МВКМ Ti-Be (волокна) взаимодействие при температуре ниже 973К отсутствует. Выше этой температуры возможно образование хрупкого интерметаллида, при этом прочность волокон практически не изменяется.

Свойства и методы получения МВКМ на основе никеля и кобальта

Существующие виды упрочнения промышленных никелевых сплавов (дисперсное твердение, карбидное упрочнение, сложное легирование и термомеханическая обработка) позволяют сохранять их работоспособность только до температур 1223-1323К. Поэтому важным явилось создание МВКМ никеля, армированных волокнами и способных работать длительное время при более высоких температурах. Применяют следующие упрочнители: нитевидные кристаллы («усы»), проволоки тугоплавких металлов, керамические и углеродные волокна.

В системе МВКМ Ni - Al₂O₃ (волокна) при нагреве на воздухе образуется оксид никеля, который взаимодействует с арматурой, в результате чего на границе образуется шпинель NiAl₂O₄. При этом связь между компонентами нарушается. Для увеличения прочности связи на арматуру наносят тонкие покрытия из металлов (W, Ni, нихром) и керамики (оксиды иттрия и тория). Так как жидкий никель не смачивает Al₂O₃, в матрицу вводят Ti, Zr, Cr, которые улучшают условия пропитки.

При комнатной температуре прочность композита никель - нитевидные кристаллы Al₂O₃, полученного электроосаждением никеля на волокна, существенно превышает прочность матрицы.

МВКМ Ni - C(волокна). Никель практически не растворим в углероде. В системе Ni - C образуется метастабильный карбид Ni₃C, устойчивый при температурах выше 1673К и ниже 723К. Обладая высокой диффузионной подвижностью, углерод насыщает никелевую матрицу за короткое время, поэтому главными разупрочняющими факторами в МВКМ Ni - C является растворение углеродных волокон и их рекристаллизация вследствие проникновения никеля в волокно. Введение в никелевую матрицу карбидообразователей (Cr, Al, Ti, Mo, W, Nb) усиливает взаимодействие матрицы с волокнами. Для повышения структурной стабильности на волокна наносят противодиффузионные барьерные покрытия из карбида и нитрида циркония, карбида титана.

МВКМ Ni - W, Mo (волокна) получают динамическим горячим прессованием, диффузионной сваркой, сваркой взрывом, прокаткой. В связи с тем, что W, Mo интенсивно окисляются при нагревах, композиты получают в вакууме или защитной атмосфере. При нагреве МВКМ на воздухе происходит окисление волокон вольфрама или

молибдена, расположенных на поверхности композита. Если волокна не выходят на поверхность, то жаростойкость МВКМ определяется жаростойкостью матрицы.

Волокнистые композиты на основе кобальта и его сплавов мало разработаны из-за большого дефицита кобальта и ограниченного использования кобальтовых сплавов по сравнению с жаропрочными сплавами на никелевой основе. В качестве упрочнителя Со-сплавов в основном применяют вольфрамовые и молибденовые проволоки. При высоких температурах предел прочности МВКМ превышает предел прочности матрицы.

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 больших 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, Mo 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.

Таблица 1

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".

Псевдосплавы

Псевдосплавы - композиционные материалы, состоящие из двух или более металлоподобных фаз, не взаимодействующих или слабо взаимодействующих между собой. Псевдосплавы могут иметь матричную или каркасную структуру. Псевдосплавы с матричной структурой обычно отличаются от дисперсно-упрочненных композитов

большим размером упрочняющих включений ($>10\mu\text{м}$) и большей их концентрацией.

Примеры псевдосплавов: Fe-Pb, Fe-Mg, W-Cu, W-Ag, Mo-Cu, Mo-Ag и др.

Псевдосплавы, сочетающие в себе структурные составляющие с резко отличными физико-механическими характеристиками, обладают важными техническими свойствами - высокими стойкостью при воздействии интенсивных тепловых потоков и демпфирующей способностью при вибрационном нагружении, самосмазкой в условиях сухого трения, электроэрозионной стойкостью и износостойкостью при работе в качестве электроконтактов. Рассмотрим более подробно основные свойства, технологические методы получения и области применения ряда конкретных псевдосплавов.

Свойства и методы получения псевдосплавов на основе железа

Промышленное применение нашли псевдосплавы Fe-Cu. Наряду с ними разработаны композиции Fe-Pb, Fe-Ag, Fe-Mg и др.

Псевдосплавы Fe-Cu. Железо и медь ограниченно взаимно растворимы. Максимальная растворимость меди в твердом железе при температуре 1373К составляет 8 - 8,5% вес, а железа в меди - 4%. При комнатной температуре взаимная растворимость компонентов незначительна. Расплавленная медь хорошо смачивает твердое железо. Краевые углы смачивания железа медью при температуре 1373К и латунью при 1273 К в водороде близки к нулю. Основным методом получения псевдосплавов Fe-Cu является пропитка медью или ее сплавами спрессованных или спеченных заготовок из порошков чистого или легированного железа. При пропитке железа чистой медью в результате активного диффузионного взаимодействия происходит эрозия железного каркаса. Кроме того, растворение меди в чистом железе приводит к образованию диффузионной пористости. Ликвидировать эти нежелательные явления позволяет использование пористого каркаса и пропитывающего материала из сплавов, взаимонасыщенных при температуре пропитки (обычно 1373 - 1473К).

Установлено, что наилучший уровень механических свойств псевдосплавов обеспечивается пропиткой в среде аргона. Свойства псевдосплавов Fe-Cu в значительной мере зависят от степени дефектности структуры. Материалы из взаиморавновесных фаз обладают более совершенным строением межфазных границ и, соответственно, более высокими показателями прочности и пластичности. Наряду с применением только двух компонентов для получения псевдосплавов Fe-Cu в качестве составляющих используют сплавы железа и меди с другими элементами. Так, тугоплавкий каркас изготавливают из смеси порошков железа и графита, железа и марганца. Железную основу легируют также Mo, Ni, Zn, Co, Al и др. Для пропитки применяют сплавы меди с Mn, Zn, Sn, Al, Co.

Псевдосплавы Fe- Cu имеют более высокую коррозионную стойкость во влажной атмосфере и в растворах солей, чем литая сталь. Для них характерны достаточно высокие демпфирующие характеристики. Декремент затухания колебаний композиций из чистых компонентов при комнатной температуре и амплитудах напряжений 100-200МПа составляет 1-2%. С ростом температуры демпфирующие характеристики псевдосплавов повышаются.

Псевдосплавы Fe-латунь получают путем пропитки железных каркасов латунью (58,33%Cu, 40,25%Zn, 1,42% Pb) при температуре 1273К в засыпке из размолотой огнеупорной глины или в графитовой форме.

Псевдосплавы Fe- Pb. Железо со свинцом не образует твердых растворов и соединений в жидком и твердом состоянии. Чистый свинец не смачивает железо при температурах, близких к температуре плавления свинца (при 600К 133°). С повышением температуры краевой угол уменьшается и при 1373К составляет 10°. Добавка в свинец олова способствует улучшению смачивания. Псевдосплавы получают в основном методами пропитки в вакууме при температурах 673-873 К с последующим приложением давления. Они обладают повышенными демпфирующими свойствами, обусловленными интенсивной пластической деформацией свинца. Однако низкие прочностные характеристики псевдосплавов ограничивают их применение в качестве конструкционных материалов.

Псевдосплавы Fe-Mg. Железо с магнием не образует растворов и соединений в твердом и жидком состоянии. Псевдосплавы получают пропиткой пористых железных и стальных каркасов расплавленным магнием и его сплавами. Уровень прочности псевдосплавов Fe-Mg ниже, чем Fe-Cu. Псевдосплавы имеют низкую коррозионную стойкость в 3%-ном растворе NaCl, причем с повышением концентрации магниевой фазы сопротивление коррозии уменьшается.

Применение нержавеющей сталей для изготовления каркасов позволяет существенно повысить коррозионную устойчивость псевдосплавов в агрессивных средах.

Свойства и методы получения псевдосплавов на основе вольфрама и молибдена

Псевдосплавы W-Cu, W-Ag широко применяют в электротехнике в качестве электроконтактных материалов. Взаимодействие вольфрама с медью и серебром отсутствует. Краевой угол смачивания вольфрама расплавленной медью уменьшается от 50° при температуре 1373К до 12° при 1523К и до 0 при 1623К. Краевой угол смачивания вольфрамовой подложки расплавленным серебром составляет 50° при 1273К, 30° - при

1523К и 15° - при 1623К.

Псевдосплавы с объемной долей вольфрама до 50% получают преимущественно путем спекания смеси компонентов в твердой или жидкой фазе, а при высокой объемной доле вольфрама (>50%) - путем пропитки. Спекание производят в диапазоне температур 1273-1627К в вакууме или атмосфере водорода. Спеченные заготовки подвергают прокатке, экструзии, волочению, штамповке. Свойства псевдосплавов можно варьировать в широких пределах, изменяя состав композита. С увеличением содержания вольфрама прочностные характеристики псевдосплавов (твердость, предел текучести, предел прочности при растяжении, изгибе и сжатии) возрастают, а показатель пластичности (относительное удлинение, ударная вязкость) ухудшаются. Повышаются удельное электросопротивление, износостойкость, электроэрозионная стойкость и переходное сопротивление.

Замена вольфрама молибденом приводит к снижению стоимости и массы изделия. Технология получения псевдосплавов Mo-Cu, Mo -Ag практически не отличается от технологии получения композиций W-Cu, W-Ag. Из этих псевдосплавов изготавливают контакты. В качестве легирующих добавок используют кобальт и никель. Псевдосплавы, легированные кобальтом, служат для изготовления сильноточных контактов. Увеличение концентрации кобальта в псевдосплаве вызывает повышение его твердости и электросопротивления. Оптимальное содержание кобальта, обеспечивающее максимальную эрозионную стойкость и стабильное переходное сопротивление электрических контактов, составляет 1-3%.

Свойства и методы получения псевдосплавов на основе никеля

В аппаратостроении широко используют псевдосплавы никель-серебро в качестве электроконтактных материалов. В псевдосплавах Ni-Ag фаза на основе серебра содержит до 1,5% Ni, а фаза на основе никеля – 3,65% Ag, величина краевого угла смачивания при температуре 1273 К близка к нулю. Псевдосплавы Ni-Ag изготавливают методом твердофазного спекания. Прессовки из смеси порошков спекают в водороде при температуре 973-1023К. Псевдосплавы также могут быть получены путем пропитки пористых заготовок никеля расплавленным серебром. Температура пропитки 1273К. Псевдосплавы Ni-Ag отличаются высокой пластичностью. Из них можно получить проволоку, прутки, ленты, полосы, из которых штамповкой изготавливают миниатюрные контактные детали для слаботочной техники. Псевдосплавы имеют высокую тепло- и электропроводность, повышенную коррозионную и эрозионную стойкость. Контакты из псевдосплавов Ni-Ag обладают низким и стабильным в работе электросопротивлением.

Свойства и методы получения псевдосплавов на основе титана

Псевдосплавы Ti-Mg предназначены для изготовления деталей узлов трения. Взаимодействие в системе Ti-Mg характеризуется образованием весьма ограниченных твердых растворов. При температуре 924К растворимость титана в магнии составляет 0,0025%, а при 1048К - 0,011%. Предельная концентрация магния в титане составляет - 5%. Промежуточные соединения в системе отсутствуют. Смачивание титановой подложки жидким магнием хорошее, при температурах выше 1000К краевой угол близок к 0°. Пропитка пористого титана магниевым сплавом приводит к существенному повышению прочности. Магний повышает работоспособность титаномагниевого псевдосплавов в узлах трения, выполняя функции смазки. В процессе трения на поверхности псевдосплавов формируется защитная пленка из магниевой составляющей, снижающая работу трения и предохраняющая от износа.

С целью повышения несущей способности при трении в состав псевдосплавов вводят дисперсные соединения тугоплавких металлов.

Области применения псевдосплавов

Псевдосплавы Fe-Cu (15-25%Cu) применяются в качестве конструкционных материалов для изготовления крупных деталей машин, подверженных ударным нагрузкам. На детали можно наносить гальванические покрытия. Из псевдосплавов Fe-Cu изготавливают компрессорные лопатки, детали буровых снарядов, резцов и корпусов фрез. Из псевдосплавов Fe-Cu (70%Fe-30%Cu) делают электрические контакты, которые отличаются хорошей пластичностью и термостойкостью.

Применение *псевдосплавов* Fe-Pb связано, в основном, с их хорошими антифрикционными свойствами. Из них изготавливают подшипники скольжения. Из псевдосплавов Fe-Pb производят седла клапанов двигателей внутреннего сгорания, а также контактные пластины токоприемников электротранспорта, поскольку они сочетают хорошие антифрикционные свойства с высокой электропроводностью и дугостойкостью.

Псевдосплавы Fe-Mg предназначены для изготовления анодов электрохимической защиты конструкционных материалов.

Из *псевдосплавов* W-Cu, W-Ag изготавливают контакты для силовых и высоковольтной коммутационной аппаратуры. Вольфрам придает псевдосплавам твердость, прочность, сопротивляемость истиранию и эрозии, медь и серебро - электро- и теплопроводность, пластичность. Высокопористые псевдосплавы W -Cu предназначены для изготовления сопел плазмотронов. Повышенная стойкость пористых псевдосплавов против высокотемпературного окислительного износа связана с образованием на рабочих

поверхностях пленки оксида меди, защищающей вольфрам. Для изготовления электрод - инструментов применяют псевдосплав W-Cu, в который введены добавки сложных оксидов La_3BO_6 , $LaBO_3$ и др. Присутствие комплексного оксида стабилизирует электрический разряд, позволяет увеличить скорость обработки и уменьшить износ электродов. Псевдосплавы W -Cu, как и тяжелые сплавы можно использовать для защиты от действия рентгеновского и γ -излучения.

Из *псевдосплавов* Mo-Cu, Mo-Ag, Ni-Ag изготавливают электроконтакты. Известны *псевдосплавы* триботехнического назначения *на основе меди и бронзы*, пропитанные свинцом, оловом, галлием, индием и их сплавами.

Лучшие антифрикционные свойства имеют псевдосплавы бронза-олово и бронза-сплав Sn -Pb.

Псевдосплавы Ti-Mg используют для изготовления подшипников в узлах трения, работающих в вакууме и агрессивных средах.

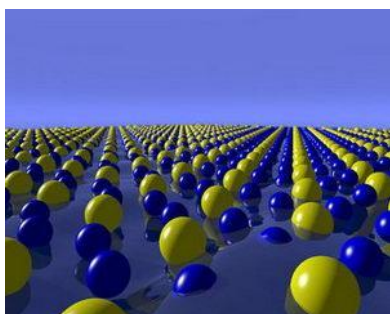
Методы получения псевдосплавов

Изготавливают псевдосплавы методами порошковой металлургии - пропиткой или спеканием в присутствии жидкой фазы. Пропитка заключается в заполнении пор спеченной или неспеченной формовки из тугоплавкого металла расплавом более легкоплавкого материала. Самопроизвольное протекание процесса пропитки сопровождается уменьшением свободной энергии системы и осуществляется при условии $\cos > 0$, где θ - краевой угол смачивания. Пропитку производят методами полного или частичного погружения пористого каркаса в расплав либо путем наложения пропитывающего материала на пористый каркас. Температура пропитки превышает точку плавления легкоплавкой фазы, но не достигает точки плавления тугоплавкой. Скорость пропитки растет при увеличении исходной пористости каркаса, размера пор и температуры процесса. Атмосфера, в которой ведется пропитка, должна быть совместимой с обеими составляющими псевдосплава и обеспечивать максимальную степень пропитки. Если $\theta = 90^\circ$, то движущая сила процесса пропитки (капиллярное давление) может оказаться недостаточной для ее осуществления. В этом случае необходимо применение дополнительных воздействий (автоклавного давления, вакуумного всасывания, электромагнитного поля и др.). Пористые каркасы под пропитку получают путем уплотнения порошков. Легкоплавкая составляющая для пропитки используется в виде литого материала, прессованной стружки или порошка.

Спекание в присутствии жидкой фазы заключается в спекании прессовок порошковой смеси компонентов псевдосплава при температурах, превышающих

температуру плавления легкоплавкой составляющей. Процесс спекания в жидкой фазе, за счет большей скорости переноса вещества, протекает значительно интенсивнее, чем в твердой. Псевдосплавы, полученные методом жидкофазного спекания, имеют матричную структуру - в легкоплавкой матрице диспергированы частицы тугоплавкой фазы.

Эвтектические композиционные материалы



Эвтектические композиционные материалы (ЭКМ) - сплавы эвтектического или близкого к нему состава, в которых армирующей фазой служат ориентированные волокнистые или пластинчатые кристаллы, образованные в процессе направленной кристаллизации. Поскольку структура в эвтектическом композиционном материале создается естественным путем, а не в результате

искусственного введения армирующей фазы в матрицу, эвтектический композит, в отличие от других композиционных материалов, называется естественным.

Эвтектический композит (ЭКМ) - естественный материал, поскольку его структура формируется при направленной кристаллизации естественным путем, а не в результате искусственного введения арматуры в матрицу. Форма выделяющейся фазы - волокнистая или пластинчатая - зависит от объемной доли упрочнителя. При объемной доле упрочнителя (меньше 32%) для ЭКМ характерна волокнистая структура, а при большей концентрации - пластинчатая. Поскольку прочность волокон выше прочности пластин, то волокнистое строение предпочтительней пластинчатого. Прочность ЭКМ существенно зависит от структуры материала, в значительной степени определяемой скоростью кристаллизации. Например, ударная вязкость ЭКМ Al - Al₃Ni при малых скоростях кристаллизации ($v < 0,6 \text{ см/ч}$), когда образуется пластинчатая микроструктура, имеет более низкие значения, чем у волокнистого материала. Однако даже в этом случае, ударная вязкость составляет $1,1-3,7 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^2$, что значительно выше ударной вязкости литейных алюминиевых сплавов. Пластинчатая эвтектика Al-CuAl₂ при испытаниях на ударную вязкость обнаруживает большую хрупкость, что является существенным недостатком этого материала. Эвтектические композиты на основе Al хорошо свариваются методом диффузионной сварки и ввиду хорошей высокотемпературной стабильности структуры, сварку можно проводить при температурах до 798K.

Если при охлаждении расплава эвтектического состава удастся создать плоский фронт кристаллизации, то возникает упорядоченная ориентированная микроструктура.

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 кг/мм^2 . Металлографические исследования показали, что процесс разрушения в таких композитах начинается с разрушения усов. Это говорит о высокой прочности связи на поверхности раздела нитевидный кристалл - матрица.

Жаропрочные ЭКМ можно разделить на две группы: хрупкие; пластичные.

Хрупкими, например, являются никелевые пластинчатые ЭКМ с объемной долей упрочнителя 33-35%. Свойства хрупких ЭКМ, рассчитанные по закону аддитивности, удовлетворительно совпадают с результатами испытаний. К пластичным ЭКМ относятся волокнистые композиты с невысокой долей упрочнителя (от 3 до 15%), например, сплавы Ni, Co, упрочненные монокарбидами Ta, Nb, Hf. Высокие механические свойства волокнистых ЭКМ на основе Ni и Co, упрочненных карбидной фазой являются результатом создания композитной структуры, пластичная матрица которой армирована высокопрочными нитевидными кристаллами.

Направленные эвтектики, состоящие из фаз с резко отличным электронным строением, обладают специальными физическими свойствами: магнитными, термоэлектрическими, оптическими и др. Наиболее изучены ЭКМ на основе полупроводниковой матрицы - антимонида индия InSb с волокнами проводников FeSb, NiSb, MnSb, CrSb. Матрица в таких композитах обладает электропроводностью $2,2 \cdot 10^2 \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}$ и существенно отличается от электропроводности волокон (для волокон NiSb – $7 \cdot 10^4 \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}$). Электросопротивление ЭКМ InSb-NiSb при взаимно перпендикулярной ориентации волокон, электрического тока и магнитного поля на порядок выше, чем для случая расположения волокон параллельно направлениям тока или магнитного поля.

ЭКМ, в которых одна или обе фазы ферромагнитны, обладают высокими магнитными свойствами. В качестве магнитных материалов используют ЭКМ, у которых коэрцитивная сила существенно увеличивается за счет создания ориентированной структуры с ферромагнитными волокнами, имеющими поперечный размер близкий к размеру доменов ($\sim 1 \text{ мкм}$). ЭКМ с ферромагнитными матрицей и волокнами, такие как $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ -Co, V_2Co_{17} -Co, FeSb-Fe, CoSb-Sb характеризуются большой коэрцитивной силой и остаточной индукцией, зависящей от содержания ферромагнитной фазы и др.

Магнитомягкие ЭКМ системы Fe-NbC, Co-NbC, (Fe-Co)-NbC состоят из магнитомягкой матрицы и неферромагнитного упрочнителя. Эти ЭКМ из-за высокой термической стабильности могут работать в условиях высоких температур и напряжений.

Направленно закристаллизованные эвтектические сплавы имеют анизотропные

электронные, магнитные и другие свойства, что определяет их применение в электронике. Так, эвтектическую композицию Al-Al₃Ni можно использовать как материал для прочных проводников. Взаимосвязь угла между направлением токопроводящих волокон в полупроводниковых эвтектических композитах InSb-Sb, GaSb-Sb, InAs-As с магнитным сопротивлением материалов позволяет использовать эти композиты в бесщеточных коммутаторах, бесконтактных переменных сопротивлениях.

Таким образом, к преимуществам эвтектических композитов следует отнести простоту их изготовления (нет необходимости отдельного изготовления "усов", исчезают трудности, связанные с их использованием), высокую прочность связи на поверхности раздела и отсутствие окисных слоев (что обеспечивает высокую термическую устойчивость - возможность длительной работы при повышенных температурах). Но для таких КМ характерно постоянство объемной доли эвтектической фазы, что делает невозможным воздействие на их свойства путем изменения состава, также для реализации плоского фронта кристаллизации необходимо использовать высокочистые вещества, так как примеси этому препятствуют.

Методы получения эвтектических композиционных материалов

Методы, применяемые для направленной кристаллизации эвтектических расплавов, аналогичны методам получения монокристаллов полупроводниковых материалов: Чохральского, направленная кристаллизация, зонная плавка (рис. 2).

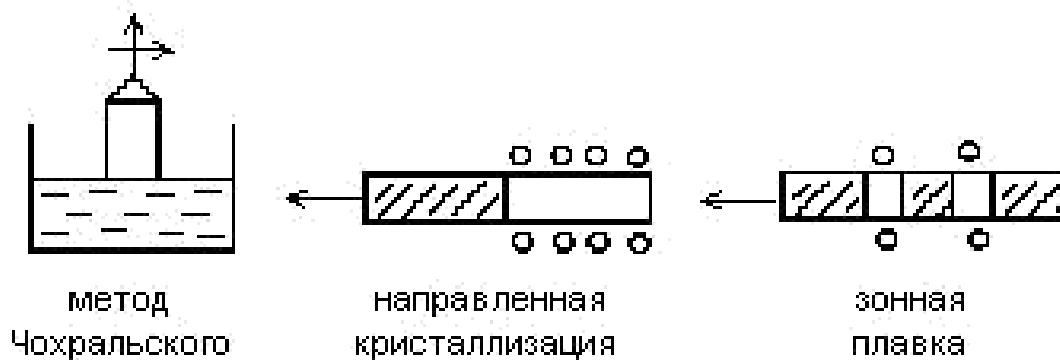


Рис. 2. Схемы методов кристаллизации

Вытянутые фазы эвтектики кристаллизуются перпендикулярно к поверхности раздела (фронта кристаллизации) и следуют за ним по мере перемещения, образуя ориентированные стерженьковые или пластинчатые структуры. При большой скорости кристаллизации образуются дисперсно-упрочненные многофазные сплавы.

Эвтектические композиционные материалы (ЭКМ) получают в процессе

направленной кристаллизации сплавов поэтому они называются естественными композитами. По микроструктуре ЭКМ похожи на матричные композиты, армированные дискретными волокнами в виде усов или тонких пластин. Для реализации такой строго ориентированной микроструктуры, которая дает наименьшую площадь поверхности раздела фаз или наименьшие значения удельной энергии межфазных границ, необходимо обеспечить плоскую поверхность между расплавом и кристаллизующимся твердым телом.

Вытянутые фазы эвтектики кристаллизуются перпендикулярно к поверхности раздела (фронта кристаллизации) и следуют за ним по мере перемещения, образуя ориентированные стерженьковые или пластинчатые структуры. При большой скорости кристаллизации образуются дисперсно-упрочненные многофазные сплавы.

Эвтектические композиционные материалы получают также методом Бриджмена. Эвтектический сплав 7, помещенный в тигель 3, сначала нагревают до расплавления с помощью индуктора 2, затем вытягивают с постоянной скоростью из зоны нагрева. Расплав последовательно затвердевает и фронт кристаллизации перемещается вверх. Скорость кристаллизации зависит от скорости вытягивания и условий теплообмена в системе. Скорость перемещения тигля с расплавом регулируется в широких пределах от 5 до 2000 мм/ч. Метод зонной плавки при получении ЭКМ заключается в локальном расплавлении и перемещении узкой зоны из сплава эвтектического состава по длине прутка-заготовки. При зонной плавке применяют электронно-лучевой и локальный индукционный нагрев. Равномерность прогрева расплавленной зоны и ее перемешивание для выравнивания состава по объему достигается вращением одной части образца, отделенной зоной расплавленного металла от другой.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы (ДКМ)

ДКМ представляют собой матрицу из чистого металла или сплава, в котором равномерно распределены на заданном расстоянии одна от другой частицы упрочняющей фазы размером $<0,1\text{ мкм}$. Объемная доля включений составляет 0,1 - 15%. В качестве упрочняющей фазы применяют дисперсные частицы оксидов, карбидов, нитридов, боридов, и других тугоплавких соединений.

Известно, что вязкий, лишенный хрупкости материал перед разрушением претерпевает значительную деформацию. Причем пластические деформации (сдвиг) в реальных кристаллических материалах начинается при напряжениях, которые меньше, чем теоретически рассчитанные, примерно в 1000 раз.

Определение деформации. Деформацией называется изменение размеров или формы тела под действием внешних сил либо физико-химических процессов,

протекающих в самом теле. Такая низкая прочность по сравнению с теоретической объясняется двумя возможными факторами:

1. в пластической деформации (сдвиг) активно участвует в дислокации;
2. сказывается масштабный фактор соотношения длины межатомных связей и размеров образца.

Чаще придерживаются 1-ой теории. При деформации благодаря дислокациям сдвиг атомов в соседнее положение происходит не одновременно по всей поверхности скольжения, а скачками во времени. Такое постепенное скольжение за счет небольших смещений атомов в области дислокаций не требует значительных напряжений, что и проявляется при испытаниях пластичных материалов.

Дислокации играют принципиальную роль в структуре и свойствах (прежде всего в прочности) ДКМ.

Понятие о дислокациях. Под дислокацией понимают особый вид линейных несовершенств кристаллической решетки, нарушающих правильное чередование атомных плоскостей. Существуют краевые и винтовые дислокации.

Механизм упрочнения ДКМ

Упрочнение таких материалов заключается в создании в них структуры, затрудняющей движение дислокации. Наиболее сильное торможение передвижению дислокаций создают дискретные частицы второй фазы, например, химические соединения типа карбидов, нитридов, боридов, оксидов, характеризующиеся высокой прочностью и температурой плавления.

Надежность материала

Проблема повышения конструкционной прочности состоит не только в повышении прочностных свойств, но и в том, как при высокой прочности обеспечить высокое сопротивление вязкому разрушению, т.е. повысить надежность материала.

В дисперсно-упрочненных материалах заданные прочность и надежность достигаются путем формирования определенного структурного состояния, при котором эффективное торможение дислокаций сочетается с их равномерным распределением в объеме материала либо (что особенно благоприятно) с определенной подвижностью скапливающихся у барьеров дислокаций для предотвращения хрупкого разрушения. В ДКМ (как и в порошковых композиционных материалах) матрица несет основную нагрузку.

Примеры ДКМ: Al - частицы Al_2O_3 ; Ni - частицы (TiC, TaC, ThO₂); Cr - частицы

MgO; Mo - частицы (TiC, NbC, ZrC, HfC) и др.

Методы получения дисперсно-упрочненных композитов

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы относятся к классу порошковых. Поэтому процесс получения полуфабрикатов ДКМ включает операции: приготовление порошковой смеси, формование, спекание, деформационная и термическая обработка.

Для приготовления порошковых смесей матричного материала и упрочняющих включений применяют механическое и химическое смешивание (разложение смеси солей, поверхностное окисление, внутреннее окисление, водородное восстановление, химическое осаждение из растворов и др.).

Далее порошковые смеси матричного материала и упрочняющих включений, полученные одним из указанных выше методов, формируют путем прессования в прессформах или прокаткой. Смешивание порошков может сочетаться с их измельчением, что может вызвать дополнительное окисление. Поэтому смешивание с измельчением металлов, имеющих большое сродство к кислороду (Nb, Ta, Ti, Cr, Zr), нужно проводить в защитной атмосфере или с применением активных добавок, образующих с оксидами легко восстанавливаемые соединения. Оксидные пленки на металлах с низким сродством к кислороду (W, Fe, Co, Cu, Mo, Ni) удаляются при последовательной термообработке в восстановительной атмосфере.

Сформованные из порошковых смесей брикеты подвергают спеканию. Поскольку при следующей операции - пластической деформации - происходит уплотнение до монолитного состояния, главной целью спекания прессовок является не повышение плотности, а дегазация и довосстановление оксидных пленок на матричном металле, что способствует повышению физико-механических свойств полученных композиций. При спекании методами горячего прессования процессы прессования и спекания совмещаются. С целью уплотнения до беспористого состояния и формирования дислокационной структуры матрицы, обеспечивающей высокую термическую стабильность, заготовки ДКМ после спекания подвергают пластической деформации. Наиболее благоприятный метод деформирования ДКМ - горячая экструзия с высокими степенями обжатия.

Для изготовления лент и листовых полуфабрикатов из ДКМ применяют горячую прокатку. Деформированные заготовки ДКМ подвергают термообработке для повышения стабильности структуры, пластичности и жаропрочности.

Свойства и методы получения ДКМ на основе алюминия

Процесс получения полуфабрикатов дисперсно-упрочненных композитов на основе металлической матрицы (ДКМ) включает следующие операции: приготовление порошковой смеси, формование, спекание, деформационная и термическая обработка.

Широкое применение в технике нашли *алюминиевые ДКМ, упрочненные оксидом алюминия*, что способствует существенному повышению жаропрочности и характеристик ползучести алюминия. Часто применяют три марки ДКМ Al-Al₂O₃, отличающиеся содержанием оксида.

САП-1 (6-9% Al₂O₃), САП-2 (9.1-13% Al₂O₃) и САП-3 (13.1- 17% Al₂O₃). При увеличении содержания Al₂O₃ в ДКМ растут твердость и прочность, а пластичность, коэффициент термического расширения, тепло- и электропроводность снижаются. САП-ы имеют высокую коррозионную стойкость, не подвержены межкристаллитной коррозии и коррозии под напряжением. Они отличаются высокой радиационной стойкостью.

Для изготовления ДКМ используют тонкодисперсные алюминиевые порошки (пудру). Предварительно дегазированные порошки брикетируют на гидравлических прессах при температуре 833-873К и давлении 300-600МПа и подвергают деформированию. ДКМ Al-Al₂O₃, полученные холодным экструдированием смеси порошков, обладают высокой износостойкостью. С увеличением содержания Al₂O₃ (до30%) предел текучести, предел прочности, относительное удлинение и вязкость ДКМ уменьшаются, а износостойкость растет.

Основной упрочняющей фазой в *ДКМ Al - С* служит карбид алюминия. Дисперсно-упрочненные композиты получают методами порошковой металлургии и литья. Износостойкие ДКМ Al - С получают также путем механического замешивания подогретого (873К) порошка графита в расплаве алюминия. Для улучшения смачивания алюминием графит покрывают медью.

ДКМ на основе алюминия с карбидами (TiC, ZrC, NbC, WC, Cr₃C₂, Mo₂C)(объемная доля 2-8%) получают путем механического смешивания с последующим прессованием, спеканием, прокаткой и отжигом. Прочностные характеристики зависят от природы химической связи упрочняющей фазы.

ДКМ Al - AlN, Al - Si₃N₄ получают методом плазмохимического синтеза, а *ДКМ Al -FeAl₃* - методом механического легирования.

Свойства и методы получения ДКМ на основе никеля

Целью создания *никелевых ДКМ* является повышение жаропрочности и снижение высокотемпературной ползучести никеля и его сплавов. В качестве упрочняющей фазы

используют оксиды, так как их стабильность в никеле при высоких температурах выше, чем других тугоплавких соединений. Имеются сведения об изготовлении ДКМ с дисперсными карбидами TiC, TaC. Наиболее широко для упрочнения никеля используют оксиды тория и гафния.

Никелевые ДКМ получают методами порошковой металлургии, а порошковые смеси для них готовят методами водородного восстановления в растворах и химического осаждения из растворов солей с последующим восстановлением. Шихту прессуют под давлением 400-600МПа и спекают в водороде при температуре 1323-1373К. Спеченные заготовки подвергают горячей экструзии или горячей прокатке, волочению, ротационной ковке, холодной прокатке.

В ДКМ с *никелевохромовой* матрицей, содержащей алюминий, и в более сложнелегированных матрицах упрочнение дисперсными частицами сочетается с упрочнением интерметаллидными фазами, выделяющимися из твердого раствора при старении. Уровень их механических свойств очень высок.

ДКМ на основе никеля обладают более высокой жаропрочностью, чем матричный материал. Дополнительное повышение жаростойкости ДКМ может быть достигнуто путем нанесения хромоалюминиевых защитных покрытий.

Соединение листов из ДКМ в сложных композитах производится методами диффузионной сварки и высокотемпературной пайки.

Свойства и методы получения ДКМ на основе хрома

Обладая рядом таких ценных свойств, как высокая температура плавления (2158К), низкая плотность ($7,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$), высокий модуль упругости (300ГПа) и повышенная жаростойкость, хром и его сплавы имеют весьма существенный недостаток, ограничивающий их применение в промышленности, - низкотемпературную хрупкость, особенно в рекристаллизованном состоянии. Повышенная хрупкость обусловлена наличием в металле примесей внедрения (азот, углерод, кислород, водород и др.). Дисперсное упрочнение способствует повышению жаропрочности, длительной прочности и снижению температуры вязко-хрупкого перехода хрома за счет рафинирующего действия на матрицу дисперсных частиц и более полной релаксации напряжений под нагрузкой. Эффективными упрочнителями являются тугоплавкие оксиды, поскольку растворимость кислорода в хrome очень мала. Преимущественно используют оксиды магния и тория. Оксид магния взаимодействует с оксидом хрома с образованием шпинели MgCr_2O_4 , активно поглощает азот, удаляя эти примеси из хромовой матрицы. Кроме того, для упрочнения хрома используют оксиды ZrO_2 , HfO_2 , La_2O_3 , а также нитриды, карбиды,

бориды титана, циркония, тантала и других тугоплавких металлов. При введении оксидов в хром достигается не столько повышение жаропрочности, сколько снижение порога хладноломкости. При легировании хрома активными нитридо-, карбидо- и борообразователями (Ti, Ta, Nb, Zr и др.) происходит выделение дисперсных частиц тугоплавких соединений. При этом существенно снижается сегрегация примесей внедрения на границах зерен.

Свойства и методы получения ДКМ на основе молибдена

При дисперсном упрочнении молибдена удается достичь значительного повышения жаропрочности и длительной прочности. В качестве упрочнителей используют карбиды, нитриды и оксиды, так как растворимость кислорода, азота и углерода в молибдене очень мала. Степень упрочнения от введения карбидов в молибден возрастает в ряду TiC, NbC, ZrC, HfC.

Повышение температурных пределов применения ДКМ на основе Mo, достигается за счет введения стабильных дисперсных фаз (ZrC, TiC, TiN и др.) в сочетании с твердорастворным упрочнением. ДКМ получают методами дуговой или плазменно-дуговой плавки. Добавки упрочняющих оксидов (ZrO₂, ThO₂ и др.) вводят в молибден методами механического смешивания, химического осаждения и внутреннего окисления. Установлено, что дисперсные частицы ZrO₂, введенные методом химического осаждения в активный порошок молибдена, оказывают значительное антирекристаллизационное влияние при спекании. Предложен метод получения смесей Mo - оксид путем селективного восстановления гелеобразных совместно осажденных гидроксидов металлов основной и упрочняющей фаз. Температура спекания таких систем на 400-450K ниже, чем для стандартных порошков молибдена.

Свойства и методы получения ДКМ на основе вольфрама

Вольфрам представляет большой интерес для техники, как основа конструкционных материалов, работающих при температурах выше 2273K. Дисперсное упрочнение может быть осуществлено карбидами, нитридами и оксидами. Присутствие дисперсных частиц стабилизирует структуру, повышает температуру начала рекристаллизации вольфрама и обеспечивает высокие механические свойства. Наиболее эффективно повышают прочностные свойства вольфрама дисперсные карбиды. Упрочнение карбидами применяют в сочетании с твердорастворным упрочнением за счет легирования рением, ниобием, танталом, молибденом.

Широкое распространение получили вольфрамовые ДКМ с оксидами, в частности,

с оксидами тория и алюмо-кремнещелочными. В связи с радиоактивностью тория ведутся работы по его замене на оксиды гафния, циркония и редкоземельных элементов. Вольфрамовые ДКМ получают методами механического и химического смешивания. При введении оксидов в твердые растворы вольфрама с рением повышаются прочностные характеристики ДКМ при комнатной и умеренных температурах и растет пластичность. Присутствие в вольфраме оксидов (ThO_2 , MgO , Al_2O_3) положительно влияет на его жаропрочность.

Свойства и методы получения ДКМ на основе серебра

Для упрочнения серебра используют оксиды кадмия, алюминия, меди, никеля, олова, индия, свинца, цинка, сурьмы, титана и др. Дисперсно-упрочненные композиты на основе серебра получают методами порошковой металлургии и избирательным внутренним окислением сплавов Ag. Взаимодействие компонентов ДКМ отсутствует вплоть до температуры диссоциации оксида. Оксидами кадмия упрочняют также псевдосплавы серебро-никель. Известны электроконтактные материалы с высокими износо-и жаростойкостью на основе серебра, упрочненные совместно оксидами кадмия, олова, индия, цинка. Получают их путем внутреннего окисления сложнoleгированных сплавов серебра. Другой способ получения: несколько различных сплавов серебра размалывают, механически смешивают, прессуют, спекают и избирательно окисляют.

Области применения ДКМ

ДКМ на основе алюминия применяют в изделиях длительно работающих при температурах 573 - 773К. Из САПов изготавливают противопожарные экраны самолетов, теплообменники для авиастроения и химической промышленности, крепеж. Высокая коррозионная стойкость и способность поглощать нейтроны позволили использовать САП для изготовления опорных элементов трубопроводов атомных реакторов. ДКМ Al-C используются для изготовления поршней двигателей внутреннего сгорания.

Никелевые ДКМ применяют для изготовления деталей двигателей, подверженных воздействию температур до 1573К и невысоких напряжений. Такие условия работы характерны для деталей сопла, камер сгорания и форсажных камер авиационных двигателей.

Дисперсно-упрочненный нихром используют в производстве горячих газопроводов, теплозащитных панелей, высокотемпературных крепежных деталей. Дисперсно-упрочненные композиты на основе хрома перспективны для изготовления рабочих и сопловых лопаток газотурбинных двигателей, нагревателей для электропечей. Прочность

печных нагревателей из хромовых ДКМ значительно превышает прочность силитовых нагревателей.

Молибденовые ДКМ, обладающие такими характеристиками, как высокая температура плавления, высокая прочность, твердость и жесткость при повышенных температурах, хорошие тепловые и электрические свойства, сопротивление термическим ударам, коррозионная стойкость в различных агрессивных средах наряду с достаточной технологичностью, обеспечивает перспективы для применения в различных областях техники. Для изготовления деталей, работающих в окислительной среде, используют молибденовые ДКМ с покрытиями.

Вольфрамовые ДКМ, упрочненные оксидами, широко применяют в светотехнике, электротехнике и электронике. Из них производят спирали для мощных ламп накаливания. Торируемый вольфрам используют для изготовления электродов газоразрядных ламп. Благодаря высоким эмиссионным свойствам ДКМ используют в электронике в качестве эмиттера электронов.

Из *ДКМ на основе серебра* производят электрические контакты для низковольтной аппаратуры, обладающие высокими электро- и теплопроводностью, электроэрозионной и коррозионной стойкостью, малой склонностью к свариванию и низким контактным сопротивлением.

Упрочненные оксидами фехрали (сплавы Fe -Cr -Al) используют в качестве нагревателей в электротехнической промышленности.

Медь эффективно упрочняется тугоплавкими оксидами (ThO_2 , BeO , Al_2O_3). Сочетание высокой жаропрочности и электропроводности открывает возможности для изготовления из медных ДКМ электроконтактов, обмоток роторов электродвигателей, трубчатых теплообменников.

ДКМ на основе титана с оксидами и карбидами служат для изготовления компрессорных дисков и других изделий, эксплуатируемые; при 873-973К.

ДКМ на основе свинца с оксидами применяют в электротехнике (пластины кислотных аккумуляторов, ванны электрохимического хромирования).

ДКМ на основе платины используют для изготовления термометров сопротивления, высокотемпературных термопар, нагревательных элементов, сосудов для получения стекловолокон и др. При использовании ДКМ увеличивается долговечность изделий, что позволяет получить существенный экономический и технический эффект.