

# Композиционные материалы

# Общая характеристика композиционных материалов или композитов

- Новая эпоха в развитии материалов началась с разработки и применения композиционных материалов (КМ), обладающих таким сочетанием физико-механических свойств, которое недостижимо в традиционных (включая конструкционные) материалах. Для того чтобы разобраться в КМ, прежде всего, необходимо определить, что понимается под этими материалами. Необходимо разделять понятия «композиционный материал» и «композиционная конструкция». Композиционный материал предназначен для изготовления деталей, а композиционная конструкция состоит из готовых деталей, сделанных из разнородных материалов. Кроме того, из-за огромного разнообразия и множества КМ трудно в одной дефиниции выделить все признаки, объединяющие композиционный материал и отделяющие его от всех других материалов.

# Общая характеристика композиционных материалов или композитов.

## Определения

- 1. *Композиционный материал – это гетерогенная система, состоящая из двух или большего числа фаз, имеющих различную физико-химическую природу, для которой характерно наличие развитых внутренних поверхностей раздела, градиентов концентраций и внутренних напряжений.*
- 2. *Композиционными называются материалы, образованные объемным сочетанием двух или большего числа химически разнородных компонентов с четкой границей между ними.*
- 3. *Композит – это материал с объемным сочетанием разнородных по форме и свойствам двух и более материалов (компонентов), с четкой границей раздела, использующий преимущества каждого из компонентов и проявляющий новые свойства, обусловленные граничными процессами (Андреева, 2001 г.).*

# Общая характеристика композиционных материалов или композитов. Структура

- Композиционный материал можно представить состоящим из нескольких фаз:
- **-одной непрерывной фазы (матрицы)**
- **-и одной или более дисперсных фаз**, или состоящих из двух или более непрерывных фаз с возможными дисперсными фазами в каждой непрерывной фазе.
- Наполнителем могут служить включения специальных компонентов в виде волокон, порошков, стружки или частиц любой иной формы. Матрицей же могут быть **металлы и сплавы, полимеры и керамические материалы**. Успех создания композиционных материалов зависит от обеспечения контролируемого физико-химического взаимодействия матрицы и наполнителя. Для повышения жаростойкости композитов на поверхности наполнителя создают специальные барьерные слои, препятствующие химическому взаимодействию с матрицей при высоких температурах. Напротив, для сочетания химически индифферентных компонентов стремятся к достижению полного смачивания поверхности наполнителя материалом матриц.

# Общая характеристика композиционных материалов или композитов

- Разнообразие композиционных материалов возрастает с каждым днем. Например, в медицине широко применяются биокомпозиты. В настоящее время разработаны биоактивные керамические, жидкокристаллические и стеклокерамические материалы, поверхности которых образуют химические связи при контакте с костной тканью и способствуют ее росту. Разработан искусственный заменитель человеческой кожи, основой которой является пористый полимер, полученный из бычьих коллагеновых волокон, скомбинированных с полисахаридом, который покрыт силиконовым каучуком.

# Общая характеристика композиционных материалов или композитов

- Широкое применение в технике получили композиты, армированные высокопрочными и высокомодульными непрерывными волокнами. К ним относят:
  - **полимерные композиты** на основе термореактивных (эпоксидных, полиэфирных, полиамидных и др.) и термопластичных связующих, армированных стеклянными (стеклопластики), углеродными (углепластики), органическими (органопластики), борными (борнопластики) и другими волокнами;
  - **металлические композиты** на основе сплавов Al, Mg, Cu, Ti, Ni, Cr, армированных борными, углеродными или карбидкремниевыми волокнами, а также стальной, молибденовой или вольфрамовой проволокой;
  - **композиты на основе углерода**, армированного углеродными волокнами (углерод-углеродные материалы);
  - **композиты на основе керамики**, армированной углеродными, карбидкремниевыми и другими жаропрочными волокнами

# Общая характеристика композиционных материалов или композитов

- К современным композитам можно отнести *металлопласты, металлополимеры, керметы* и многие другие, обладающие комплексом полезных свойств, позволяющих использовать их в самых разнообразных областях, вытесняя привычные более дорогостоящие и менее экономичные материалы. Например, замена алюминия углеродэпоксидным композитом в фюзеляже самолетов позволила сократить общие расходы на производство более чем на 30 %.
- Композиты на основе углерода (углепластики) сочетают низкую плотность с высокой теплопроводностью, химической стойкостью, постоянством размеров при резких перепадах температуры, а также с возрастанием прочности материала при нагреве до 2000 °С в инертной среде.

# Композиционные материалы на основе металлической матрицы

- В качестве материала основы (матрицы) наиболее широко применяют такие металлы как алюминий (Al), магний (Mg), титан (Ti), никель (Ni), кобальт (Co).
- По структуре и геометрии армирования композиты могут быть представлены в виде
  - МВКМ - волокнистых (волокно)
  - ДКМ - дисперсно-упрочненных (порошки)
  - ЭКМ - псевдо- и эвтектических сплавов ( )



# Волокнистые композиты на основе алюминиевой матрицы

Тип волокна	Свойства	Методы получения
Стальное	Прочность определяется прочностью волокон. Повышается предел выносливости	1. Прокатка; 2. Горячее прессование; 3. Сварка взрывом; 4. Диффузионная сварка.
Кремнезем	Скорость ползучести ( $v_{\text{полз}}$ ) при $T = 473-573 \text{ K}$ на два порядка ниже $v_{\text{полз}}$ матрицы; хорошая демпфирующая способность	Волокна пропускаются через расплав матрицы, с последующим горячим прессованием.
Борные	Высокие прочность и жесткость при $T = 673-773 \text{ K}$ .	1. Диффузионная сварка. 2. Жидкофазные методы (пропитка, различные виды литья и т. д.) (на волокна бора нанесены защитные покрытия – карбид кремния или нитрид бора)
Углерод	Высокие показатели прочности и жесткости при малой плотности. Недостаток – нетехнологичность волокон (хрупкость и высокая реакционная способность)	1. Пропитка жидким металлом (армирование непрерывными волокнами) 2. Порошковая металлургия (армирование дискретными

# Волокнистые композиты на основе магниевой матрицы

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

Тип волокна	Свойства	Методы получения
борные	Высокие прочностные свойства. Пониженная коррозионная стойкость	1. Методы пропитки и литья. 2. Диффузионная сварка (листовые композиции)
углерод		Пропиткой или горячим прессованием в присутствии жидкой фазы. Растворимость углерода в магнии отсутствует. Для улучшения смачивания углеродных волокон жидким магнием их предварительно покрывают Ti (путем плазменного или вакуумного напыления), Ni (электролитически) или комбиниро-

# Композиционные материалы на основе титановой матрицы

- *Свойства и методы получения МВКМ на основе титана.*  
Армирование титана и его сплавов повышает жесткость и расширяет диапазон рабочих температур интервала до 973-1073 К. 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.

# Волокнистые композиты на основе титановой матрицы

Тип волокна	Свойства	Методы получения
Mo	Повышенная длительная прочность по сравнению с титаном; прочность при высоких температурах; высокая плотность; снижение удельной прочности	метод динамического горячего прессования заготовок «сэндвич» в вакуумированных контейнерах
SiC	Повышенные абсолютные и удельные характеристики. Волокна более устойчивы в матрице. Высокие значения внеосевой прочности предела ползучести	диффузионная сварка в вакууме (хрупкость волокон)
B	Повышенные абсолютные и удельные характеристики; При $T > 1073$ К под давлением образуются хрупкие бориды титана, разупрочняющие композит. Высокая кратковременная и длительная	диффузионная сварка в вакууме (хрупкость волокон)

# Композиционные материалы на основе никелевой матрицы (3)

- *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 сохранить их работоспособность только до интервала температур 1223-1323 К. 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

# Композиционные материалы на основе никелевой матрицы

Тип волокна	Свойства	Методы получения
$Al_2O_3$	<p>при нагреве на воздухе образуется оксид никеля, который взаимодействует с арматурой, в результате чего на границе образуется шпинель <math>NiAl_2O_4</math>. 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 <math>Al_2O_3</math>, в матрицу вводят Ti, Zr, Cr, которые улучшают условия пропитки; <math>T=300\text{ K}</math> прочность композита, полученного электроосаждением никеля на волокна, существенно превышает прочность матрицы</p>	
C	Никель практически не растворим в углероде.	

# Области применения волокнистых композитов на основе металлической матрицы

- МВКМ применяются при низких, высоких и сверхвысоких температурах, в агрессивных средах, при статических, циклических ударных, вибрационных и других нагрузках. Наиболее эффективно используются в конструкциях, особые условия работы которых не допускают применения традиционных металлических материалов. Армированием металлов волокнами стремятся улучшить свойства матричного металла, чтобы повысить рабочие параметры тех конструкций, в которых до этого использовали неармированные материалы.

# Области применения волокнистых композитов на основе металлической матрицы

Тип Сплава	Область применения
МВКМ на основе алюминия: высокая удельная прочность	Снижение массы в конструкциях лета-тельных аппаратов. Замена традицион-ных материалов на МВКМ в основных деталях и узлах самолетов, вертолетов и космических аппаратов уменьшает мас-су изделия на 20-60 %
Алюминиевый сплав, армированный стекловолокном, содержащим оксид урана: повышенная прочность при $T=823\text{ K}$	в качестве топливных пластин ядерных реакторов в энергетике
высокожаропрочные МВКМ на основе никеля и хрома, армированные волок-нами $\text{Al}_2\text{O}_3$ .	Наиболее актуальна в газотурбострое-нии задача повышения термодинами-ческого цикла энергетических устано-вок. Даже малое повышение температу-ры перед турбиной значительно увели-чивает КПД газотурбинного двигателя. Обеспечивают работу



# Композиционные материалы на основе никелевой матрицы

## • ***Дисперсно-упрочненные композиты.***

• Процесс получения полуфабрикатов *дисперсно-упрочненных композитов* на основе металлической матрицы (ДКМ):

- 1. Приготовление порошковой смеси,
- 2. Формование
- 3. Спекание
- 4. Деформационная обработка
- 5. Термическая обработка.

# Дисперсно-упрочненные композиты на основе алюминиевой матрицы

Тип наполнителя	Свойства	Методы Получения
Оксид алюминия $Al_2O_3$ (тонкодисперсные алюминиевые порошки (пудра)). В марке указывается в % САП-1 (6-9 %) САП-2 (9,1-13 %) САП-3 (13,1-17 %).	Широкое применение в технике. Существенное повышение жаропрочности и характеристик ползучести алюминия. Высокая коррозионная и радиационная стойкость, износостойкость; Не подверженность межкристаллитной коррозии и коррозии под напряжением. При увеличении содержания $Al_2O_3$ растут твердость и прочность, а пластичность, коэффициент термического расширения, тепло- и электропроводность снижаются. С увеличением содержания $Al_2O_3$ (до 30 %) предел текучести, предел прочности, относительное удлинение и вязкость падают, а износостойкость растет.	1. а) Дегазированные порошки брикетируют на гидравлических прессах при $T=833-873\text{ К}$ и $P=300-600\text{ МПа}$ б) подвергают деформированию.

# Дисперсно-упрочненные композиты на основе алюминиевой матрицы

Тип наполнителя	Свойства	Методы Получения
Карбид алюминия Основная упрочняющая фаза Al – C.	Прочностные характеристики зависят от природы химической связи упрочняющей фазы.	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Методы порошковой металлургии</li><li>2. Метод литья.</li><li>3. Метод механического замешивания подогретого (873 К) порошка графита в расплаве алюминия. Для улучшения смачивания алюминием графит медью.</li><li>4. Метод механического смешивания TiC, ZrC, NbC, WC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Mo<sub>2</sub>C с последующим прессованием, спеканием, прокаткой и отжигом.</li></ol>

# Дисперсно-упрочненные КОМПОЗИТЫ на основе алюминиевой матрицы

Тип наполнителя	Свойства	Методы Получения
Al – AlN Al – Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>		1. Метод плазмохимического синтеза
Al – FeAl <sub>3</sub>		1. Метод механического легирования

# Композиционные материалы на основе никелевой матрицы

- *Свойства и методы получения ДКМ на основе никеля.* Цель 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.
- Методы получения никелевых ДКМ: методы порошковой металлургии: 1. Приготовление порошковых смесей - методами водородного восстановления в растворах и химического осаждения из растворов солей с последующим восстановлением. 2. Прессование шихты под давлением 400-600 МПа. 3. Спекание в водороде при температуре 1323-1373 К. 4. Горячая экструзия или горячая прокатка.
- 5. Волочение. 6. Ротационная ковка. 7. Холодная прокатка.

# Композиционные материалы на основе металлической матрицы

- В ДКМ с никелевохромной 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.

# Композиционные материалы на основе хромовой матрицы

- *Свойства и методы получения ДКМ на основе хрома.*  
Обладая рядом таких ценных свойств, как высокая температура плавления (2158 К), низкая плотность ( $7,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ), высокий модуль упругости (300 ГПа) 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 вязкохрупкого перехода хрома за счет рафинирующего действия на матрицу дисперсных частиц и более прочной релаксации напряжений под нагрузкой. Эффективными упрочнителями являются тугоплавкие оксиды, поскольку растворимость кислорода в хrome очень мала. Преимущественно используют оксиды магния и тория.

# Композиционные материалы на основе хромовой матрицы

- 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.



# Композиционные материалы на основе молибденовой матрицы

- *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 молибдене 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 (ZrO<sub>2</sub>, ThO<sub>2</sub> и др.) вводят в молибден методами механического смешивания, химического осаждения и внутреннего окисления. Установлено, что дисперсные частицы ZrO<sub>2</sub>, введенные методом химического осаждения в активный порошок молибдена, оказывают значительное антирекристаллизационное влияние при спекании.

# Композиционные материалы на основе вольфрамовой матрицы

- *Свойства и методы получения ДКМ на основе вольфрама.* Вольфрам представляет большой интерес для техники, как основа конструкционных материалов, работающих при температурах выше 2273 К. 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.

# Композиционные материалы на основе металлической матрицы

- Широкое распространение получили вольфрамовые ДКМ с оксидами, в частности, с оксидами тория алюмо-кремнещелочными присадками. 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 ( $\text{ThO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) положительно влияет на его жаропрочность.

# Композиционные материалы на основе серебрянной матрицы

- *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 сложнелегированных сплавов серебра. Другой способ получения: несколько различных сплавов серебра размалывают, механически смешивают, прессуют, спекают и избирательно окисляют.

# Области применения ДУКМ

Тип композита	Область применения
ДУКМ на основе алюминия Высокая коррозионная стойкость и способность поглощать нейтроны	Изделия, длительно работающие при температурах 573-773 К (противопо-жарные экраны самолетов, теплооб-менники для авиастроения и химичес-кой промышленности, крепеж). Из САП изготавливают опорные элементы тру-бопроводов атомных реакторов.
ДУКМ Al-C	поршни двигателей внутреннего сгора-ния.
Никелевые ДУКМ	детали двигателей, подверженных воз-действию температур до 1573 К и не-высоких напряжений (детали сопла, ка-мер сгорания и форсажных камер авиа-ционных двигателей).
Дисперсно-упрочненный нихром	производство горячих газопроводов, теплозащитных панелей, высокотем-пературных крепежных деталей

# Области применения ДУКМ

Тип композита	Область применения
ДУКМ на основе хрома	изготовление рабочих и сопловых лопаток газотурбинных двигателей, нагревателей и электропечей. Прочность печных нагревателей из хромовых ДУКМ значительно превышает прочность селитовых нагревателей.
Молибденовые ДУКМ:	Применение в различных областях техники. Для изготовления деталей, работающих в окислительной среде, используют молибденовые ДУКМ с покрытиями. Свойства: высокая температура плавления, прочность, твердость и жесткость при повышенных температурах, хорошие тепловые и электрические свойства, сопротивление термическим ударам, коррозионная стойкость в различных агрессивных средах, достаточная технологичность
Вольфрамовые ДУКМ, упрочненные оксидами	Светотехника, электротехника и электроника. Из ДУКМ производят спирали для мощных ламп накаливания. Торируемый вольфрам используют для изготовления электродных газоразрядных ламп. Благодаря высоким эмиссионным свойствам, ДУКМ используют в электронике в качестве эмиттера электронов.

# Области применения ДУКМ

Тип композита	Область применения
ДУКМ на основе серебра	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 с тугоплавкими оксидами ( $\text{ThO}_2$ , $\text{BeO}$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	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	Компрессорные диски и другие изделия, эксплуатируемых при 873-973 К
ДКМ на основе свинца с оксидами	Электротехника (пластины кислотных аккумуляторов, ванны электрохимического хромирования).

# Композиционные материалы на основе металлической матрицы

- ***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 предпочтительнее пластинчатого.



# Композиционные материалы на основе металлической матрицы

- Прочность ЭКМ существенно зависит от структуры материала, в значительной степени определяемой скоростью кристаллизации. Например, ударная вязкость ЭКМ Al – Al<sub>3</sub>Ni при малых скоростях кристаллизации (< 0,6 см/ч), когда образуется пластинчатая микроструктура, имеет более низкие значения, чем у волокнистого материала. Однако даже в этом случае, ударная вязкость составляет 1,1-3,7·10<sup>5</sup> Дж/м<sup>2</sup>, что значительно выше ударной вязкости литейных алюминиевых сплавов. Пластинчатая эвтектика Al – CuAl<sub>2</sub> 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 798 К.

# Композиционные материалы на основе металлической матрицы

- Если при охлаждении расплава эвтектического состава удастся создать плоский фронт кристаллизации, то возникает упрочненная 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  $175 \text{ кг/мм}^2$ . Металлографические исследования показали, что процесс разрушения в таких композитах начинается с разрушения усов. Это свидетельствует о высокой прочности связи на поверхности раздела нитевидный кристалл – матрица.
- Для эвтектического сплава Ni – NbC (11 % об.) средняя прочность волокон –  $586 \text{ кгс/мм}^2$ . Эти же волокна, выделенные путем растворения матрицы, имели прочность  $1030 \text{ кгс/мм}^2$ , что свидетельствует о высоком совершенстве нитевидных кристаллов, формирующихся в процессе направленной кристаллизации эвтектики.

# Композиционные материалы на основе металлической матрицы

- Жаропрочные ЭКМ можно разделить на две группы: хрупкие и 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, упрочненные карбидной фазой являются результатом создания композитной структуры, пластинчатая матрица которой армирована высокопрочными нитевидными кристаллами.

# Композиционные материалы на основе металлической матрицы

- Направленные эвтектики, состоящие из фаз с резко отличным электронным строением, обладают специфическими 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.

# Композиционные материалы на основе металлической матрицы

- 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 ( $\sim 1$  мкм). ЭКМ с ферромагнитными матрицей и волокнами, такие как  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17} - \text{Co}$ ,  $\text{V}_2\text{Co}_{17} - \text{Co}$ ,  $m \text{FeSb} - \text{Fe}$ ,  $\text{CoSb} - \text{Sb}$  характеризуются большой коэрцитивной силой и остаточной индукцией, зависящей от содержания ферромагнитной фазы и др.
- Магнитомягкие ЭКМ системы  $\text{Fe} - \text{NbC}$ ,  $\text{Co} - \text{NbC}$ ,  $(\text{Fe} - \text{Co}) - \text{NbC}$  состоят из магнитомягкой матрицы и неферромагнитного упрочнителя. Эти ЭКМ из-за высокой термической стабильности могут работать в условиях высоких температур и напряжений.

# Композиционные материалы на основе металлической матрицы

- Направленно закристаллизованные эвтектические сплавы имеют анизотропные электронные, магнитные и другие свойства, что определяет их применение в электронике. Так, эвтектическую композицию Al – Al<sub>3</sub>Ni можно использовать как материал для прочных проводников. Взаимосвязь узла между направлением токопроводящих волокон в полупроводниковых эвтектических композициях InSb – Sb, GaSb – Sb, InAs – As с магнитным сопротивлением материалов позволяет использовать эти композиты в бесщеточных коммутаторах, бесконтактных переменных сопротивлениях.

# Композиционные материалы на основе металлической матрицы

- Преимущества эвтектических композитов:
  - простота их изготовления (нет необходимости отдельного изготовления «усов», исчезают трудности, связанные с их использованием);
  - высокая прочность связи на поверхности раздела и отсутствие окисных слоев;
  - высокая термическая устойчивость – возможность длительной работы при повышенных температурах.
- Недостатки эвтектических композитов:
  - из-за постоянства объемной доли эвтектической фазы невозможно воздействовать на их свойства путем изменения состава;
  - для реализации плоского фронта кристаллизации необходимо использовать высокочистые вещества, так как примеси этому препятствуют.