



Композиционные материалы

Курс лекций: «Стеклокристаллические и композиционные материалы на основе стекла» для магистрантов



Классификация КМ по виду матрицы. Свойства КМ

Лекция 2

Классификация по природе матрицы



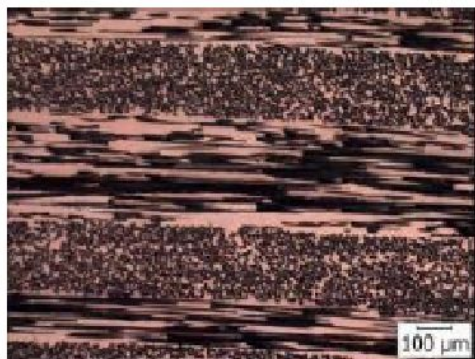
Виды композиционных материалов

Материал матрицы	Материал наполнителя			
	полимеры	металлы	керамика	углерод
Полимеры	упрочненные термостойкие	проводящие	упрочненные облегченные	упрочненные
Металлы	облегченные проводящие	упрочненные армированные		упрочняющие нанокompозиты
Керамика	облегченные и высокопористые	упрочненные армированные	упрочненные термостойкие	упрочненные
Углерод	-	-	-	Легкие, высокопрочные термостойкие в инертной среде

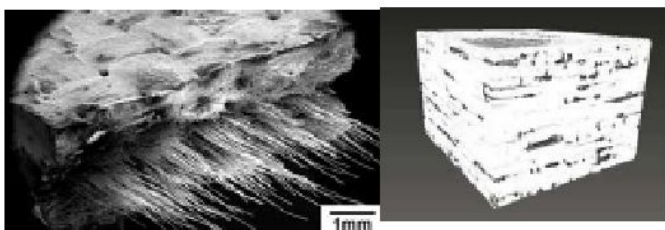
Композиты с разными матрицами

В композитах армирующие элементы связаны изотропной

- ✓ полимерной,
- ✓ металлической,
- ✓ керамической
- ✓ углеродной матрицами.



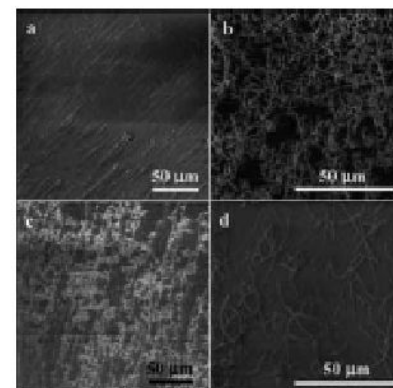
Cu(X)/HM carbon fibres



Ceramic Matrix Composites



Стеклопластик



Композиты углерод-углерод

Классификация КМ по материалу матрицы

- Полимерные композиционные материалы
- Углеродные композиционные материалы
- Металлические композиционные материалы
- Керамические композиционные материалы
- Стекловидные и стеклокристаллические композиционные материалы.

СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Матрица	Армирующий наполнитель	Плотность, г/см ³	$\sigma_{\text{изг.}}^*$, ГПа	Модуль упругости, ГПа
	Полимерные			
Эпоксидная	Стеклопластиковое волокно	1,9 2,2	1,2 2,5	50 68
	Органическое (арамидное) волокно	1,3-1,4	1,7 2,5	75 90
	Углеродное волокно	1,4 1,5	0,8 1,5	120 220
	Борное волокно	2,0 2,1	1,0 1,7	220
	Металлические			
Алюминиевая	Борное волокно	2,6	1,0 1,5	220 250
	Углеродное волокно	2,3	0,8-1,0	200-220
Магниева	Борное волокно	2,0	0,7 1,0	200 220
	Углеродное волокно	1,8	0,6 0,8	180 220
Никелевая	Вольфрамовая проволока	12,5	0,8	265
	Молибденовая проволока	9,3	0,7	235
	Углеродные			
Углеродная	Углеродное волокно	1,5 1,8	0,35 1,0*	120 220
	Керамические			
Керамическая	Волокно карбида кремния	3,2	0,48*	

* Прочность при изгибе.

Композиты на основе полимерной матрицы

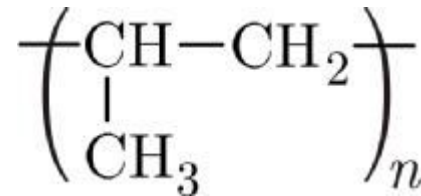
- Преимуществом являются: хорошая технологичность, низкая плотность и часто высокие удельная прочность и жесткость, высокая коррозионная стойкость.
- Недостатки же для большинства композиционных материалов на полимерной основе характерны следующие: низкая прочность связи волокна с матрицей, резкое падение прочности при повышении температуры выше 100-200°С.
- В качестве материала матрицы наибольшее распространение получили полимеры: эпоксидная, фенолоформальдегидная, полиамидная смолы.
- В качестве наполнителей используются углеродные, борные, стеклянные и органические волокна в виде нитей, жгутов, лент и т.д. По типу волокна композиционные материалы разделяют на следующие группы: углеволокниты, бороволокниты, стекловолокниты и органоволокниты

Типы полимерных матриц

- 1. Терморреактивные : полиэфирные и кремнийорганические смолы и полиимиды.
- 2. Термопластичные – полиэтилен, полипропилен, полиуретан и т.п.
- Терморреактивные матрицы необратимо полимеризуются при более высоких температурах (250-350 °С), чем термопластичные.
- Полимеризация терморреактивных матриц процесс необратимый, а термопластичных – обратимый.
- В качестве наполнителей в тех и других матрицах используют органические и неорганические волокна (стекловолокно, бороволокно, углеродное волокно, арамидное волокно и т.п.) и порошки дисперсных наполнителей разной природы.

Полимерные матрицы

- Полимер – макромолекула, состоящая из повторяющихся структурных групп, обычно связанных между собой ковалентными связями.
- Два типа полимеров:
 - 1) термоотверждающийся полимер (эпоксидная смола)
 - 2) термопластичный полимер (полиамид)
- **Преимущества термопластичных полимеров перед термоотверждающимися:**
 - - Не отвердевают при высоких температурах
 - - Не ограничен срок хранения
 - - Возможность переработки
 - - Меньшая потребность в химической обработке
 - - Возможность формования с помощью температуры
 - - Свариваемость
 - - Высокая ударная вязкость
 - - Устойчивость к воздействию окружающей среды
- **Недостатки термопластичных полимеров перед термоотверждающимися:**
 - - Ограниченность методов обработки и высокие температуры обработки
 - - Сложность встройки волокон



- **Преимущества полимерных матриц перед другими матрицами:**
- - Малый вес
- - Малая стоимость
- - Простота обработки (в частности, требует сравнительно низких температур, не превышающих 400 °C)
- **Недостатки полимерной матрицы:**
- - Плохие механические свойства (низкие прочность, удароустойчивость)
- - Плохая температурная устойчивость
- - Большой коэффициент теплового расширения
- **Применение:**
- 1) полимерные матрицы, усиленные волокнами, используют для создания прочных лёгких структур, (корпуса летательных аппаратов)
- 2) включение металлических частиц в полимерную матрицу позволяет использовать композит в качестве электрических интерконнекторов (оптически прозрачных)
- 3) резиновые матрицы, усиленные частицам сажи, используют при производстве шин
- 4) композиты с биосовместимыми матрицами используют для

Механические свойства композитов на основе полимеров

Материал	плотность $\rho, \text{Т/м}^3$	прочность $\sigma_{\text{В}}, \text{МПа}$	уд. прочность $\sigma_{\text{В}}/\rho, \text{км}$	$\delta,$ %
Карбоволокниты КМУ	1,3-1,5	600-1000	40-70	0,4- 0,6
Бороволокниты КМБ	2,0	900-1300	40-65	0,4
Органоволокниты	1,15-1,4	200-700	15-50	2-20
Стекловолоконит ы	2,2	2100	96	

- **Органопластики** — композиты, в которых наполнителями служат органические синтетические, реже — природные и искусственные волокна в виде жгутов, нитей, тканей, бумаги и т.д.
- В термореактивных органопластике матрицей служат, как правило, эпоксидные, полиэфирные и фенольные смолы.
- Органопластики обладают низкой плотностью, они легче стекло- и углепластиков, обладают относительно высокой прочностью при растяжении; высоким сопротивлением удару и динамическим нагрузкам, но, в то же время, низкой прочностью при сжатии и изгибе.
-
- Органопластики: клееные деревянные конструкции, фанеры, древесные пластики, древесностружечные и древесноволокнистые плиты и балки, древесные прессмассы и пресспорошки, термопластичные древесно-полимерные композиты.



88DB.com



- **Стеклопластики** - полимерные композиционные материалы, армированные стеклянными волокнами, которые формируют из расплавленного неорганического стекла.
- В качестве матрицы применяют как термореактивные синтетические смолы (фенольные, эпоксидные, полиэфирные и т.д.), так и термопластичные полимеры (полиамиды, полиэтилен, полистирол и т.д.).
- Стеклопластики обладают высокой прочностью, низкой теплопроводностью, высокими электроизоляционными свойствами, кроме того, они прозрачны для радиоволн.
- Слоистый материал, в котором в качестве наполнителя применяется ткань, плетенная из стеклянных волокон, называется **стеклотекстолитом**.

Структура стеклопластика



Стеклопластики

Типы стеклопластиков и их классификация

	Тип армирующего материала	Классы стеклопластиков
Ориентированные стеклопластики	Нить, ровинг	Однонаправленный ортогонально-армированный; со сложной схемой армирования
	Ткань; нетканый ориентированный клееный или вязально-прошивной материал	Стеклотекстолит
Хаотически армированные стеклопластики	Рубленая нить	На основе премиксов; препрегов, стекломатов
	Непрерывная нить	На основе матов типа ХЖКН; пресс-материалов типа АГ-4В

Свойства стеклопластиков

Материал	Плотность, кг/м ³	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа, не менее	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Удельная прочность, км	Удельная жесткость км	Коэффициент теплопроводнос ти, Вт/(м•К)	Термический коэффициент линейного расширения 10 ⁷ , К ⁻¹
<i>Металлы</i>							
Сталь Ст. 3	7800	400	200	5,10	2560	65	1,3
Алюминиевый сплав Д-16	2800	300	72	10,7	2580	150	2,2
Титан	4500	350	115	17,8	2560	—	—
<i>Древесина</i>							
Сосна	550	100	10	13,8 *	1540	0,35	0,6
Дуб	720	130	15	15,2	1750	0,5	1,0
<i>Пластмассы</i>							
Полиэтилен	960	20	0,5	2,1	52	0,3	10
Винипласт	1400	60	3	4,3	210	0,1	6,5
Пресс-порошок фенольный	1300	45	8	3,5	610	0,2	10
<i>Стеклопластики</i>							
Однонаправленный	2000	1600	56	80,0	2800	0,4	1
Стеклотекстолит	1900	500	30	26,2	1570	0,3	1,5
Хаотически армированный	1400	100	8	6,7	530	0,25	2,5

Структура и свойства стеклопластиков

- Структура стеклопластиков определяется в основном видом, соотношением размеров армирующих элементов и расположением их в полимерной матрице. Механические характеристики стеклопластиков, в свою очередь, определяются главным образом арматурой. Исследования показывают, что структура оказывает определенное влияние также на теплофизические, светотехнические, радиотехнические, электротехнические и другие свойства композитных материалов. Это относится, прежде всего, к ориентированным стеклопластикам, свойства которых можно широко варьировать изменением структуры за счет изменения, как типа армирующего материала, так и схемы его ориентации

Пресс - материалы

Стекловолокнит - это композиция, состоящая из синтетической смолы, являющейся связующим, и стекловолокнистого наполнителя.



Гранулированный стекловолокнит – материал на основе комплексных стеклянных нитей, пропитанных модифицированным фенолформальдегидным связующим.



Прессовочный материал создан на основе модифицированной фенолоформальдегидной смолы в качестве связующего и стеклянных нитей в качестве наполнителя.



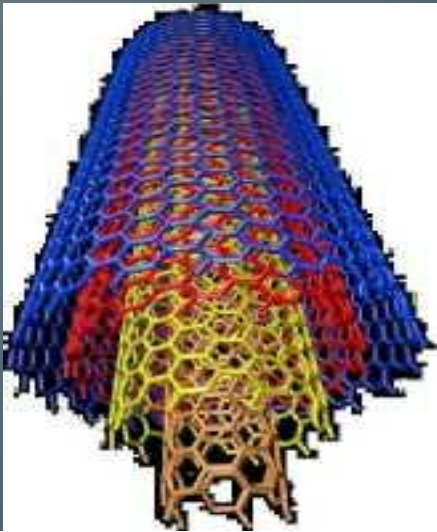
Премикс - тестообразная масса, изготовленную на основе ненасыщенных полиэфирных смол, рубленного стекловолокна и других добавок



Недостатки стеклопластиков

- Структурная неоднородность и недостаточная стабильность технологии изготовления
- Чувствительность стеклопластиков к предыстории изготовления и к температурно-временному режиму последующей эксплуатации
- Анизотропия механических, теплофизических и других свойств
- Образование трещин в прослойках связующего между волокнами
- Относительно низкий модуль упругости

- **Углепластики** - наполнителем в этих полимерных композитах служат углеродные волокна. Углеродные волокна получают из синтетических и природных волокон на основе целлюлозы, сополимеров акрилонитрила, нефтяных и каменноугольных пеков и т.д.
- Матрицами в *углепластиках* могут быть как терморезактивные, так и термопластичные полимеры. *Основными преимуществами углепластиков по сравнению со стеклопластиковыми является их низкая плотность и более высокий модуль упругости, углепластики — очень легкие и, в то же время, прочные материалы.*
- На основе углеродных волокон и углеродной матрицы создают композиционные углеграфитовые материалы — наиболее термостойкие композиционные материалы (*углеуглепластики*), способные долго выдерживать в инертных или восстановительных средах температуры до 3000° С.



УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

На основе углеродных волокон делают самый теплостойкий *углерод-углеродный композит* (УУКМ), в котором матрицей, склеивающей углеродные волокна, служит практически чистый углерод.

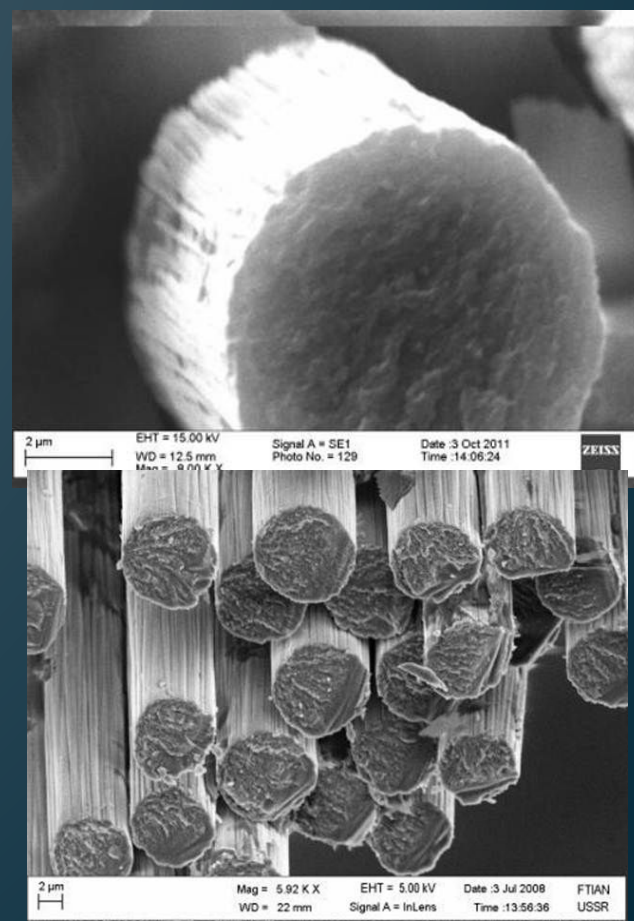
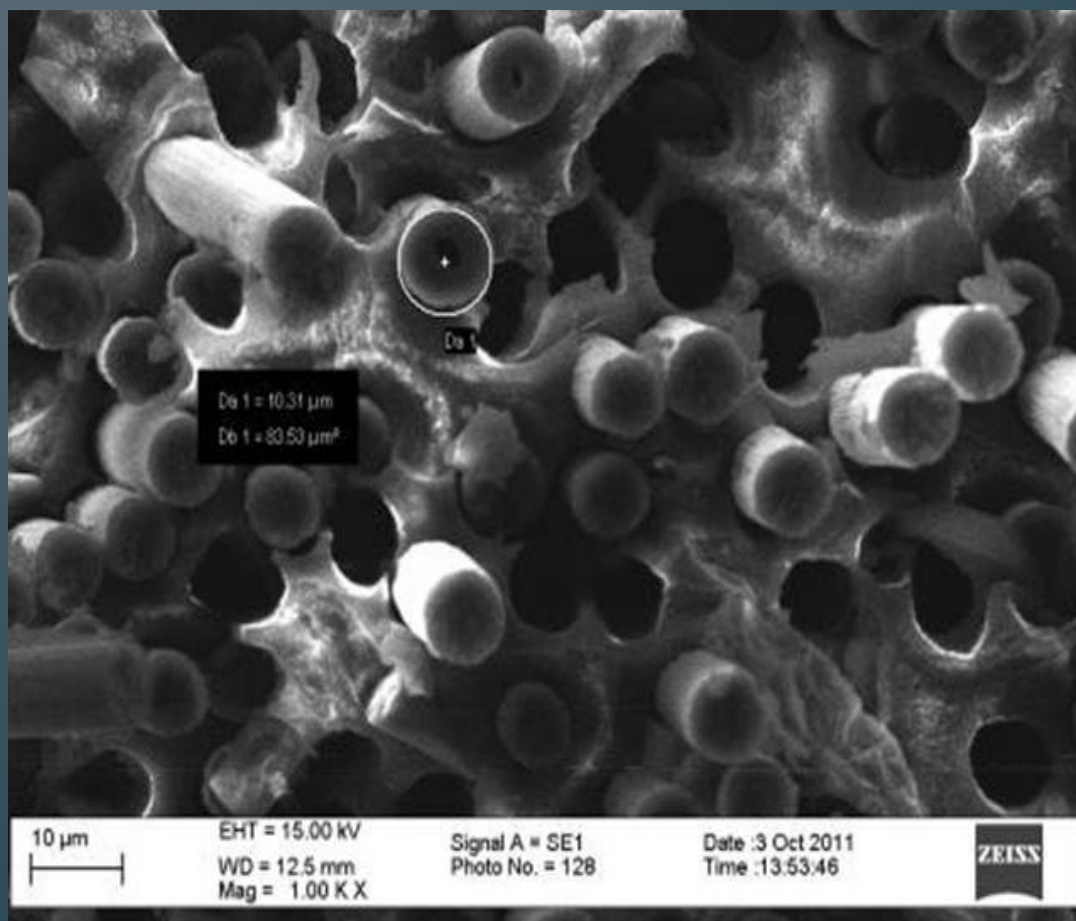
Углеродные волокна (УВ)

Как известно, механическая прочность твердых тел определяется силой межатомной связи этого вещества. Для твердого тела механическая прочность и твердость пропорциональны. Из природных тел наибольшую твердость имеет алмаз, в котором имеются прочные межатомные связи углерод-углерод. Вот эти связи и можно использовать для создания высокопрочных волокон.

Связи углерод-углерод имеются не только в алмазе, но и в графите. Последний имеет слоистую структуру. Внутри слоев имеются прочные связи углерод-углерод, а между слоями межатомные связи углерод-углерод слабые, их называют Ван-дер-Ваальсовыми. Если чешуйки графита расположить вдоль волокон, то волокно получится прочнее.

Углеродные матрицы

Углерод – углеродные материалы – композиционные углеграфитовые материалы на основе углеродной матрицы и углеродных волокон.



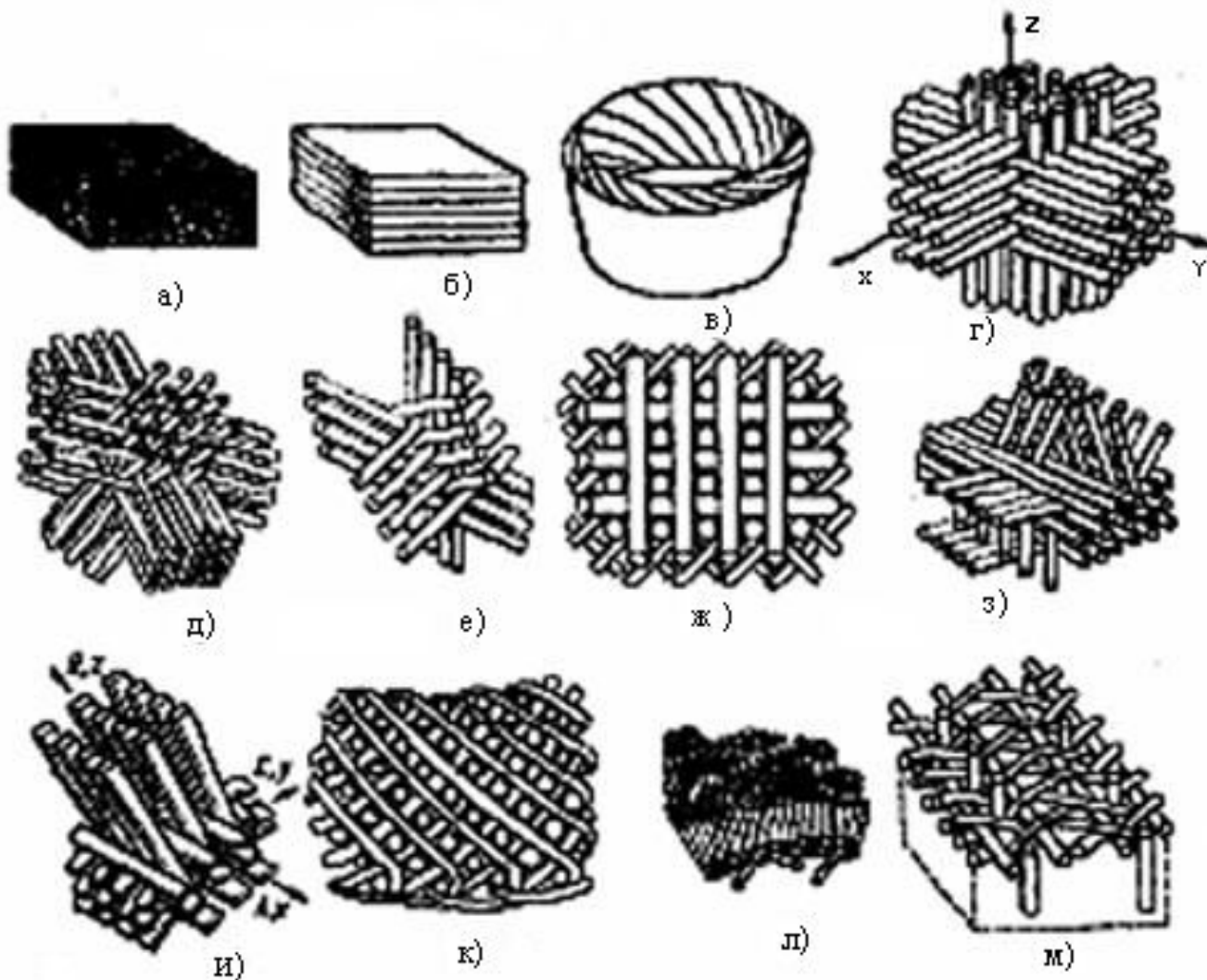
Углерод-углеродные композиты УУКМ

Содержат в себе углеродный формирующий элемент в виде дискретных волокон, непрерывных нитей или жгутов, лент, тканей с плоским и объемным плетением, объемных каркасных структур. Волокна располагаются неупорядоченно в одном, двух и трех направлениях.

Углеродная матрица объединяет в одно целое формирующие элементы в композите, что позволяет лучшим образом воспринять различные внешние нагрузки. К количеству специальных свойств УУКМ относится низкая пористость, низкий коэффициент термического расширения, сохранение структуры и свойств при нагреве до 2000 °С.

Преимущества УУКМ позволяют успешно их применять в качестве тормозных дисков в самолетах, соплах ракетных двигателей, защиты крыльев космических челноков, пресс-формах, тиглях, роторах турбин.

Расположение волокон в УУКМ



- Углеродную матрицу получают посредством карбонизации углеродной матрицы. Процесс карбонизации (пиролиз) заключается в удалении из полимера всех неуглеродных атомов.
- Присутствие углеродных волокон делает матрицу более прочной и устойчивой к тепловому шоку. В связи с малой плотностью углерода удельные прочность, модуль Юнга, теплопроводность одни из самых высоких среди композитных материалов.
- Коэффициент теплового расширения близок к нулю.
- Область использования:
 - 1. Лёгкие структуры (носовые обтекатели для космических шаттлов), которые должны выдерживать высокие температуры
 - 2. Биомедицина (имплантанты) в связи с высокой биосовместимостью (большей чем у золота) углерода
- Недостатки: высокая стоимость, подверженность окислению ($2C + O_2 \rightarrow 2CO$)

Сравнительные механические свойства материалов [10-4]

Материал	Плотность 10^{-3} , кг/м ³	Прочность при рас- тяжении, МПа	Модуль упругости, ГПа	Удельная разрывная прочность, МПа·м ³ /кг	Удельный модуль упругости, МПа·м ³ /кг
Стеклоуглерод	1,4	124	32	0,09	22,8
Поликристалличес- кий графит выс- шего качества	1,9	42	12	0,02	6,42
Углеродные волокна: высокопрочные	1,74	2900	215	1,66	123,6
высокомодульные	1,95	2200	290	1,12	200,0
КМУУ					
UD	1,45	1350	175	0,93	120,0
3D	1,85	250	90	0,14	48,5
Углепластик на эпоксидной смоле, UD	1,56	1400	130	0,9	83,0
Сталь	7,8	1100	210	0,14	27,0
Алюминиевые сплавы	2,8	420	77	0,15	23,3
	3,5	350	400	0,10	114,3

Сравнение физико-механических характеристик ПКМ на основе углеродных волокон (УВ) с различными конструкционными

Тип материала	Прочность, МПа	Модуль упругости, ГПа	Плотность, гр./куб. см
Композит на основе углеродного среднепрочного волокна УВ СПУ (S – Strength)	1900	135	1,6
Композит на основе углеродного высокопрочного волокна УВ ВПУ (HS – High Strength)	3000	154	1,6
Композит на основе углеродного высокомодульного волокна УВ ВМУ (HM – High Modulus)	2400	> 230	1,6
Композит на основе стекловолокна S класса СВ - S	870	40	1,8
Алюминиевый сплав (2024-T4)	450	73	2,7
Титан	950	110	4,5
Малоуглеродистая сталь (55 сорт)	450	205	7,8
Нержавеющая сталь (A5-80)	800	196	7,8
Быстрорежущая сталь (17/4 H900)	1241	197	7,8

Углеродные волокна (УВ) – органический материал, содержащий 92 - 99,99 % углерода. Углеродные волокна получают путем ступенчатой термообработки различных химических волокон (прежде всего на основе полиакрилонитрила - ПАН) при температурах до 3200°C.

По сравнению с обычными конструкционными материалами (алюминием, сталью и др.) композиционные материалы на основе УВ (углепластики) обладают экстремально высокими характеристиками – прочностью, сопротивлением усталости, модулем упругости, химической и коррозионной стойкостью, в разы превышающими аналогичные показатели стали, при этом имеют меньшую массу.

Основные достоинства и недостатки материалов КМУУ

Достоинства:

- -высокая теплостойкость;
- -стойкость к тепловому удару и облучению;
- -химическая инертность;
- -высокие механические характеристики при повышенных температурах;
- -малая плотность, что позволяет применять их в теплонагруженных защитных и конструкционных элементах.

Недостатки:

- -хрупкостьу глеродной матрицы;
- -сложность процесса получения;
- -высокая стоимость.

2.3 Металлические матрицы

Композиты с
металлической матрицей

```
graph TD; A[Композиты с металлической матрицей] --> B[Армированные волокнами (волокнистые композиты)]; A --> C[Наполненные тонкодисперсными частицами, не растворяющимися в основном металле (дисперсно-упрочненные композиты).];
```

Армированные
волокнами (волокнистые
композиты)

Наполненные
тонкодисперсными
частицами, не
растворяющимися в
основном металле
(дисперсно-упрочненные
композиты).

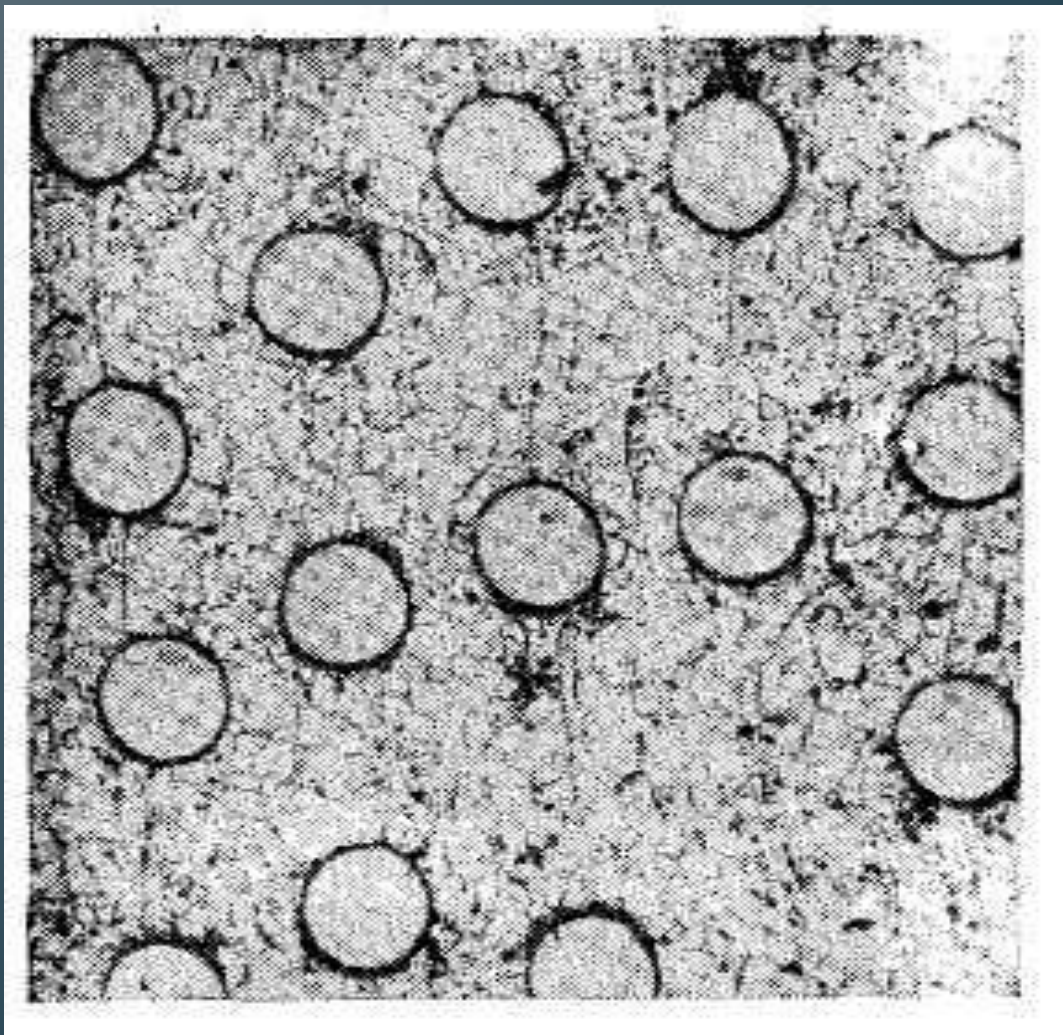
- **Композиты на металлической матрице** — это металлы или сплавы на основе алюминия, магния, титана, армированные как волокнами, не подверженными пластической деформации (карбид кремния, окись алюминия, бор, углерод, нитевидные кристаллы тугоплавких соединений), так и пластически деформируемыми металлическими волокнами (бериллий, вольфрам, молибден, сталь). Первая группа обладает максимальной прочностью, сопротивлением усталости, жаропрочностью, а также — высокими удельными характеристиками вследствие низкой плотности наполнителей. Вторая группа — технологичностью при сравнительно небольших значениях прочности и модуля упругости.
- Металлическая матрица существенно повышает упругость и прочность композита, сохраняя эти свойства почти до своей температуры плавления. Композиты обладают лучшей работоспособностью в вакууме и в условиях

- От обычных сплавов волокнистые композиты отличаются высокими прочностными показателями, пониженной склонностью к трещинообразованию и высокой удельной прочностью. Их прочность определяется свойствами волокон. Матрица скрепляет волокна и распределяет напряжения между ними. При этом механические свойства волокнистых композитов вдоль волокон значительно лучше, чем в поперечном направлении.
- Волокнистые композиты малопластичны, однако, скорость распространения трещин в них настолько мала, что практически исключается возможность их внезапного разрушения. Еще одна их особенность – малая скорость разупрочнения во времени. Недостатком таких композитов является также относительно низкое сопротивление межслойному сдвигу, однако это сопротивление значительно выше у волокнистых композитов с объемной укладкой волокон.

Волокнистые металломатричные композиты

- Упрочнителями служат волокна или нитевидные кристаллы В, С, Al_2O_3 , Si и др., а также проволока из металлов и сплавов: Мо, W, Be, высокопрочная сталь. Объемная доля упрочнителя варьируется от нескольких единиц до 80-90%.
- В качестве матриц для металлических композиционных материалов используют металлы: Al, Mg, Ti, Ni и сплавы на их основе.
- Прочность КМ зависит от прочности сцепления волокон наполнителя с матрицей. Для улучшения сцепления, проводят вискеризацию поверхности волокон, т.е. на поверхности углеродных, борных и других волокон перпендикулярно их длине выращивают монокристаллы карбида кремния SiC. Полученные таким образом "мохнатые" волокна называют "борсик". Вискеризация

Волокнистый металломатричный композит титан+молибден

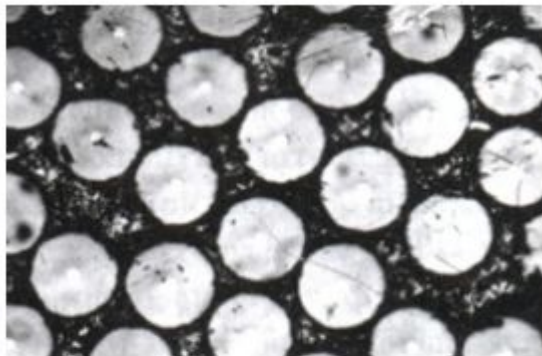


Волокнистые композиты с металлической матрицей

Волокнистые композиты с металлической матрицей имеют два основных преимущества по сравнению с более распространенными композитами с полимерной матрицей:

- 1) могут использоваться при значительно более высоких температурах;
- 2) более эффективны в относительно малогабаритных сильнонагруженных элементах конструкций.
- Типичными композитами с металлической матрицей являются:
 - - бороалюминий (волокно бора—матрица на основе алюминиевых сплавов);
 - - углеалюминий (композиты с углеволокном);
 - - композиты с волокном карбида кремния (SiC) в титановой или титан-алюминивой матрице;

Бороалюминий и КММ на основе алюминиевой матрицы



Промышленное применение нашел материал ВКА-1, содержащий 50% непрерывных высокопрочных волокон бора в матрице алюминия.



По модулю упругости и теплостойкости бороалюминевые композиты превосходят все высокопрочные алюминиевые сплавы. Бор мало разупрочняется с повышением температуры, поэтому композиты сохраняют высокую прочность до 400 – 500 °С. Высокая демпфирующая способность материала обеспечивает вибропрочность изготовленных из него конструкций.

Таблица 13.2 - Свойства компонентов КМ на основе алюминиевой матрицы

Тип волокна	γ , г/см ³	σ_b , МПа	E , ГПа	σ_b/γ , км	E/γ , 10 ³ км	α , 10 ⁻⁶ К ⁻¹	T_{max} , °С
Матрица из Al-сплава	2,63–2,8	250–573	69–73	20	2,5	11–13	150
С	2,1–2,3	850/70	360/35	90	20	1,0–3,6	500
В	2,6	1800/330	250/140	70	10	6,0	540
SiC	2,85–2,9	1600/350	230/140	56	7	6,1	300
В · SiC	2,7–2,8	1400/320	220/180	50	–	–	–
Al ₂ O ₃	3,4	1200	260/140	34	7	–	–

Примечание: В числителе – продольные, в знаменателе – поперечные значения прочностных характеристик.





КММ с матрицей на основе магния

- Для создания металлических КМ с малой плотностью применяется магний. Композиционные материалы на основе магния на 30% легче, чем сплавы алюминия.
- Магний – один из легких металлов, для которого не возникает проблем взаимодействия с углеродными, борными волокнами и волокнами из карбида кремния.

Таблица 13.3 - Свойства металлических КМ на основе магниевой матрицы

Свойства	Магниевые сплавы	Армирующие волокна		
		С	В	Al ₂ O ₃
γ , г/см ³	1,74–1,83	1,9–1,95	2,15	2,5–2,9
σ_n , МПа	200–280	825	550	530
E , ГПа	43–45	352	150	210
$\sigma_{уд}$, КМ	15,5	115*	25	20
$E_{уд}$, 10 ³ КМ	2,5	23*	7	8
α , 10 ⁻⁶ К ⁻¹	14–15	–	–	–
T_{max} , °С	–	300–320	–	–

* Проектируемые значения свойств.

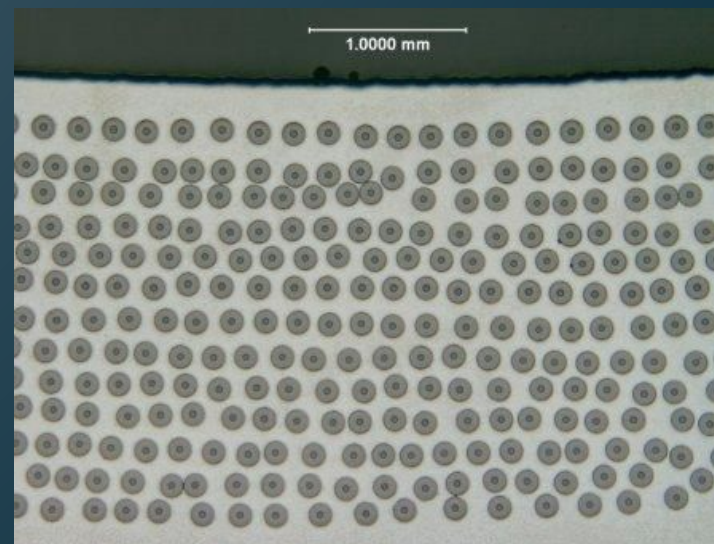
КММ с матрицей на основе титана

Металлы с высокой пластичностью и прочностью хорошо совмещаются с высокопрочными и жесткими волокнами с низкой плотностью и пластичностью, образуя КМ с повышенной жесткостью и малой массой. Примером такой комбинации может быть титан, армированный волокнами бора или карбида кремния. Однако такие системы имеют пониженную усталостную прочность из-за остаточных напряжений и химического взаимодействия между волокнами и матрицей при высоких температурах изготовления

Таблица 13.4 - Свойства металлических КМ на основе титановой матрицы

Свойства	Титановые сплавы	Армирующие волокна		
		B	SiC	B · SiC
γ , г/см ³	4,5	3,3-3,5	3,8-4,0	3,7-3,9
σ_b , МПа	500-1200	1500/550	1720/650	1400/550
E , ГПа	113	230	250/200	290/200
$\sigma_{уд}$, км	27	43	46	37
$E_{уд}$, 10 ³ км	2,6	6,5	7,5	7,5
α , 10 ⁻⁶ К ⁻¹	9	-	-	4,5-5,7
T_{max} , °С	490	650	700	-

Примечание: В числителе – продольные значения прочностных характеристик, в знаменателе – поперечные.



Дисперсноупрочненные КМ с металлической матрицей

- В отличие от волокнистых, в дисперсноупрочненных композитах матрица является основой, воспринимающей нагрузку, тогда как дисперсные частицы, являющиеся наполнителем, тормозят движение дислокаций в матрице.
- Наиболее оптимальным является размер частичек 10...15 нм и расстояние между ними 100...150 нм при равномерном распределении частиц.
- Подобные композиты можно получить на основе практически всех применяемых в технике металлов и сплавов, например, САП – спеченный алюминиевый порошок. В САП матрицей является алюминий, а наполнителем – мелкие частички оксида алюминия Al_2O_3 (6 – 8 %).
- С увеличением содержания Al_2O_3 повышается предел прочности САП на растяжение и уменьшается относительное его удлинение.

Свойства спеченых алюминиевых порошков

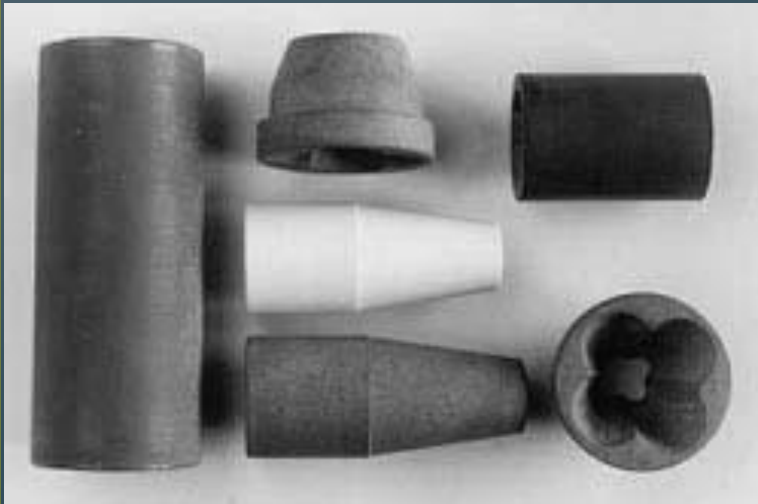
Материал	Содержание Al_2O_3 , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
САП-1	6-8	300	220	7
САП-2	9-12	350	280	5
САП-3	13-17	400	320	3
САП-4	18-22	450	370	1,5

Керамические материалы

Под **керамикой** понимаются материалы, получаемые спеканием неметаллических порошков природного или искусственного происхождения.

По составу керамику можно подразделить на **кислородную** состоящую из оксидов металлов и неметаллических элементов бериллия, магния, алюминия, кремния, титана, циркония и **бескислородную** – нитридную, карбидную, боридную и др.

По структуре керамика может быть **аморфная**,
кристаллическая.



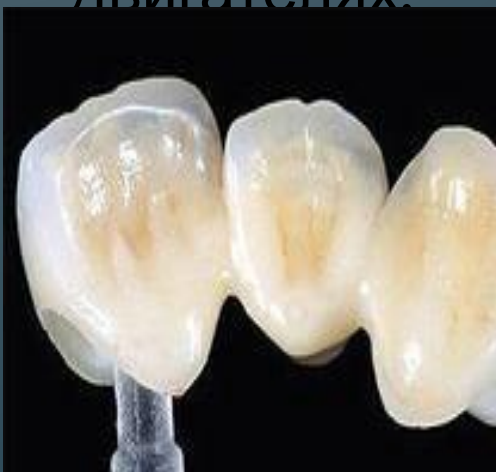
Эти материалы перспективны для инструментов, деталей двигателей внутреннего сгорания, фильтров, нагревательных элементов, элементов источников питания и др. **На фото:** Сопла для газосварочных аппаратов из керамики на основе карбида кремния.

Керамические матрицы

Керамика –неметаллический поликристаллический материал (обычно получаемый спеканием порошков) –оксиды, карбиды, нитриды и пр.

- Применение керамики позволяет снизить расход дорогих и дефицитных металлов: титана и тантала в конденсаторах, вольфрама и кобальта в режущих инструментах, кобальта, хрома и никеля в тепловых

двигателях.



Виды керамики в промышленности

- В современной промышленности применение нашли следующие виды керамик:
 - - алюмосиликатная,
 - - кремнеземистая ($>80\% \text{SiO}_2$),
 - - кварцевая (чистый SiO_2),
 - - динасовая (добавки оксида кальция, оксидов железа),
 - - корундовая ($>90\% \text{Al}_2\text{O}_3$),
 - - кордиеритовая ($\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{MgO}$),
 - - цирконовая (ZrSiO_4),
 - - сподуменовая ($\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Li}_2\text{O}$) и др.

Характеристики основных видов керамики

Таблица 14.1 - Характеристика основных видов керамики

Функциональный тип керамики	Используемые свойства	Применение	Используемые соединения
Электрокерамика	Электропроводность, электроизоляционные, диэлектрические и пьезоэлектрические свойства	Интегральные схемы, конденсаторы, вибраторы, зажигатели, нагреватели, термисторы, транзисторы, фильтры, солнечные батареи, твердые электролиты	BeO, MgO, Y ₂ O ₃ , ZnO, Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , SiC, B ₄ C, TiC, CdS, титанаты, Si ₃ N ₄
Магнетокерамика	Магнитные свойства	Головки магнитной записи, магнитные носители, магниты	Магнитомягкие и магнитотвердые ферриты
Оптокерамика	Прозрачность, поляризация, флуоресценция	Лампы высокого давления, ИК-прозрачные окна, лазерные материалы, световоды, элементы оптической памяти, экраны дисплеев, модуляторы	Al ₂ O ₃ , MgO, Y ₂ O ₃ , SiO ₂ , ZrO ₂ , TiO ₂ , Y ₂ O ₃ , ThO ₂ , ZnS, CdS

Характеристики основных видов керамики (продолжение)

Хемокерамика	Абсорбционная и адсорбционная способность, каталитическая активность, коррозионная стойкость	Сорбенты, катализаторы и их носители, электроды (например, топливных элементов), датчики влажности газов, элементы химических реакторов	ZnO, Fe ₂ O ₃ , SnO, SiO ₂ , MgO, BaS, CeS, TiB ₂ , ZrB ₂ , Al ₂ O ₃ , SiC, титаниды
Биокерамика	Биологическая совместимость, стойкость к биокоррозии	Протезы зубов, суставов	Системы оксидов
Термокерамика	Жаропрочность, жаростойкость, огнеупорность, теплопроводность, коэффициент термического расширения (КТР), теплоемкость	Огнеупоры, тепловые трубы, футеровка высокотемпературных реакторов, электроды для металлургии, теплообменники, теплозащита	SiC, TiC, B ₄ C, TiB ₂ , ZrB ₂ , Si ₃ N ₄ , BeS, CeS, BeO, MgO, ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , композиты
Механокерамика	Твердость, прочность, модуль упругости, вязкость разрушения, износостойкость, триботехнические свойства, КТР, термостойкость	Керамика для тепловых двигателей, уплотнительная, антифрикционная и фрикционная керамики, режущий инструмент, пресс-инструмент, направляющие и другие износостойкие детали	Si ₃ N ₄ , ZrO ₂ , SiC, TiB ₂ , ZnB ₂ , TiC, TiN, WC, B ₄ C, Al ₂ O ₃ , BN, композиты

Керамические КМ

Керамические композиты представляют собой материалы, в которых матрица состоит из керамики, а арматура – из металлических и неметаллических наполнителей.

- Армирование керамики производится металлическими, углеродными и керамическими волокнами.
- Керамические материалы получают на основе высокоогнеупорных оксидов тория, алюминия, бериллия, циркония, магния, ванадия. Сопоставление свойств керамики и металлов привело к попыткам создания КМ, в которых керамическая матрица сочетается с металлическими включениями в виде порошка (керметы). Это материалы, которые содержат более 50 % тугоплавкой металлической фазы. Созданы керметы на основе карбида титана и оксида алюминия,

спюды и никеля, оксида системы алюминий –

Механические характеристики некоторых керамических композитов

Таблица 14.4 - Свойства основных марок режущей керамики

Фирма-изготовитель	Марка	Состав основной фазы	Твердость		Прочность при изгибе, МПа	Плотность, г/см ³	Средний размер зерен, мкм
			HRA	HV			
ВНИИТС (Россия)	BO-13	Al ₂ O ₃	92	-	450-500	3,96	1-3
	ВОК-60	Al ₂ O ₃ + TiC	94	-	600-650	4,25	1-3
«Feldniuhle» (Германия)	SN60	Al ₂ O ₃ + ZrO ₂	-	2200	600	3,97	2
	SN20	Al ₂ O ₃ + TiC	-	2100	600	4,28	2
«Hertel» (Германия)	SN100	Si ₃ N ₄ + Y ₂ O ₃	-	1700	800	3,30	-
	AC5	Al ₂ O ₃ + ZrO ₂	-	1700	500	4,00	1,8
	MC2	Al ₂ O ₃ + TiC	-	2000	-	4,25	-
	HC1	Si ₃ N ₄	-	1500	800	3,30	-
«Sandvik»	CC620	Al ₂ O ₃ + ZrO ₂	-	1650	-	-	2-3
«Ceramant» (Швеция)	CC650	Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ + TiO ₂	-	1800	400-500	4,27	-
	CC680	Si ₃ N ₄	91,2	1500	-	-	-
«Krupp-Widia» (Германия)	Widalox	Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ + TiO ₂	-	1730	650	4,12	-
«NGK» (США)	CX2	Al ₂ O ₃ + TiN	-	-	750	4,15	-
Россия	Эльбор	-	-	-	700	3,45	-

Механические характеристики ударопрочной керамики

- Наиболее высокие защитные свойства имеют материалы на основе карбида бора. Их массовое применение сдерживается высокой стоимостью метода прессования. Поэтому плитки из карбида бора используют при необходимости существенного снижения массы броневой защиты, например для защиты кресел и автоматических систем управления вертолетов, экипажа и десанта. Керамику из диборида титана, имеющую наибольшую твердость и модуль упругости, применяют для защиты от тяжелых бронебойных и бронепрожигающих танковых снарядов.

Таблица 14.5 - Свойства ударопрочной керамики

Материал	Плотность γ , г/см ³	Твердость по Кнупу H_K , ГПа	σ_s , МПа	E , ГПа	$T_{пл}$, К	Критерий бронестойкости M , (ГПа · м) ³ × × К/кг
Горячепрессованный карбид бора B_4C	2,5	30	300	450	3300	$5,3 \cdot 10^3$
Горячепрессованный диборид титана TiB_2	4,5	33	350	570	3400	$5,0 \cdot 10^3$
Карбид кремния SiC	3,1	21	200	410	3300	$1,8 \cdot 10^3$
Спеченный оксид алюминия Al_2O_3	3,9	18	370	390	2320	$1,5 \cdot 10^3$
Бронева сталь	7,8	3,5	3000	210	1950	$0,5 \cdot 10^3$

Керамика в ракетно-космическом машиностроении

Исследовательский центр НАСА США (NASA Ames Research Centre) разработал составы теплозащитных волокнистых керамических плит, предназначенных для космических кораблей многоразового использования.

Таблица 14.6 - Составы и свойства теплозащитных плит из волокнистой керамики для космических кораблей многоразового использования

Марка материала	Состав, % (мас.)		Al ₂ O ₃	$\alpha, 10^{-7} \text{ К}^{-1}$	$\sigma_{\text{ср}}, \text{ кПа}$	Плотность $\gamma, \text{ г/см}^3$	Температура поверхности теплозащиты, К	Абляция за 60 с, м	Средняя скорость уноса, м/с
	SiO ₂	Боросиликатное стекло							
FRCI	78	22	–	7,2	1800	0,18–0,22	1670–1733	0,012–0,014	$3,9 \cdot 10^{-3}$
АЕТВ12-20	68	12	20	10,1	2800	0,17–0,18	1670–1790	0,02–0,03	$2,3 \cdot 10^{-3}$
НТР16-22	78	–	22	9,9	–	0,22–0,27	1730	0,025	–

Достоинства и недостатки керамических КМ

- **Достоинства:**

- -высокая температура плавления;
- -высокая прочность при сжатии и растяжении;
- -стойкость к вибрации и термоудару;
- -стойкость к окислению;

- **Недостатки:**

- -хрупкость ,которая снижает область их применения;
- -малая возможная область применения из – за специфических физико – механических свойств

СКМ со стеклянными матрицами

- - пористое стекло
- - вспененное стекло
- - стекло и стеклокристаллические материалы с частицами (Al_2O_3 , муллит, ZrO_2 , Ag, Y_2O_3) создают с целью улучшения и управления теплофизическими, диэлектрическими, оптическими с др. свойствами,
- - стекло и стеклокристаллические материалы с частицами углерода, углеволоконными, фуллеренами (оптические свойства, электропроводность и др).