

#### 4. УПРОЧНИТЕЛИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Цель работы: изучение различных упрочнителей.

Задание: изучить виды и свойства упрочнителей. Их возможные композиции с различными матрицами.

Из металлических упрочнителей широко применяют стальную проволоку, которая является наиболее дешевым и технологичным упрочнителем. В настоящее время в основном используют проволоку из коррозионностойких сталей аустенитного, аустенитно-мартенситного и мартенситного классов. Высокая степень пластической деформации при получении проволоки обуславливает большую пластичность структурных дефектов и высокие прочностные характеристики. Например, проволока из стали 18x15H5AM3 диаметром 0,16-0,3 мм. имеет  $\sigma_{\text{т}} = 3500 \dots 4000$  МПа. Высокая температура рекристаллизации обеспечивает стальной проволоке сохранение прочности при высокой температуре (до 500 °С), особенно из сталей аустенитного класса.

При изготовлении КМ с алюминиевой матрицей, армированной стальной проволокой, температура не должна превышать 550 °С во избежание активного взаимодействия между компонентами. КМ получают сваркой, взрывом, прокаткой в вакууме, диффузионным спеканием. Для надежного сцепления компонентов при использовании твердофазных методов необходимо обновление контактных поверхностей, разрушение оксидных пленок.

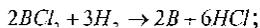
Более высокой жаропрочностью обладает проволока из тугоплавких металлов (Mo, W, Ta). Высокие прочностные свойства такой проволоки сохраняются до 1200-1500 °С и поэтому ее применяют для армирования жаропрочных матриц.

Для повышения длительной прочности на поверхность проволоки наносят методом напыления тонкие (4-12 мкм) барьерные покрытия, например, из карбидов титана и гафния, оксидов алюминия и гафния. Это увеличивает рабочие температуры и срок службы жаропрочных сплавов. Недостатком напылителя является их высокая плотность.

Малой плотностью и большой удельной прочностью обладает проволока из бериллия. Механические свойства проволоки высоко зависят от качества ее поверхности. Бериллиевую проволоку получают выдавливанием из литой или порошковой заготовки, заключенной в оболочку. Лучшим материалом оболочки является никель. После волочения оболочку с проволоки удаляют и для улучшения поверхности проволоку подвергают электрохимическому полированию. При волочении проволоки, предназначенной для получения КМ в качестве оболочки используют материал матрицы, и в этом случае отпадают операции правки и полирования. Ценным свойством сильнодеформируемой бериллиевой проволоки является высокая температура рекристаллизации (700 °С). Бериллиевую проволоку целесообразно применять для армирования

матриц, обладающих малой плотностью, т. е. на алюминиевой, титановой или магниевой основах.

Для армирования металлических и полимерных матриц широко используют борные волокна. Они характеризуются высокой прочностью, твердостью, малой склонностью к разрушению при повышении температуры. Борные волокна получают разложением хлорида и бромида бора в среде водорода по реакции



с последующим осаждением бора из газовой среды на горячей вольфрамовой нити ( $d = 12$  мкм). В результате взаимодействия бора с вольфрамом сердцевина борных волокон состоит из боридов вольфрама различного состава:  $WB$ ,  $W_2B_3$ ,  $WB_4$ . При продолжительном нагреве сохраняется в основном  $WB_4$ . Волокна бора имеют ромбическую кристаллическую решетку и диаметр  $d = 70...200$  мкм.

Прочность сердцевины значительно ниже прочности волокна в целом. В сердцевине возникают напряжения растяжения. Это приводит к появлению остаточных напряжений и возникновению радиальных трещин. При небольшой плотности волокна бора обладают высокой прочностью и жесткостью. Высокая прочность борных волокон объясняется мелкокристаллической структурой. Большое влияние на прочность оказывает и структура их поверхности. Поверхность имеет ячеистое строение, напоминающее по внешнему виду початок кукурузы (см. рис. 1.3). Наличие крупных зерен на поверхности, а также включений, трещин, пустот снижают прочность борных волокон. При температуре выше  $400^\circ C$  борные волокна окисляются, а выше  $500^\circ C$  вступают в химическое взаимодействие с алюминиевой матрицей. Для повышения жаростойкости и предохранения от взаимодействия с матрицей на борные волокна наносят покрытия из карбида кремния, карбида и нитрида бора толщиной 3-5 мкм.

В настоящее время наряду с чисто борными волокнами выпускают волокна бора, оплетенные стекловолокном. Такие комбинированные волокна обладают более высокой устойчивостью. Основным недостатком борных волокон - высокая стоимость, которую можно снизить путем увеличения диаметра, а также заменой вольфрамовой основы на углеродную.

Высокими прочностью, удельной прочностью и термической стабильностью механических свойств отличаются высокомодульные углеродные волокна. Их получают путем высокотемпературной термической обработки в инертной среде из синтетических и органических волокон. В зависимости от вида исходного продукта углеродные волокна могут быть в виде нитей, жгута, тканых материалов, лент, войлока. Наиболее широко для производства углеродных волокон используют вискозу, полиакрилатрия (ПАН).

При нагреве синтетическое волокно разлагается с образованием лентообразных слоев углерода с гексагональной структурой, называемых микрофибриллами (рис. 4.1, а-в). Группы одинаково ориентированных микрофибрилл, разделенных узкими порами, образуют фибриллы. Поперечные

размеры фибрилл лежат в широких пределах. Каждое углеродное волокно состоит из тысяч фибрилл. Структура углеродного волокна, в частности, взаимное расположение фибрилл и степень их ориентации зависят от исходного сырья: состава макромолекул, степени вытяжки волокон, технологии их получения и др. В связи с этим углеродные волокна, полученные из разных синтетических волокон, имеют различные свойства и даже различный характер соотношения между прочностью и жесткостью (рис. 4.2).

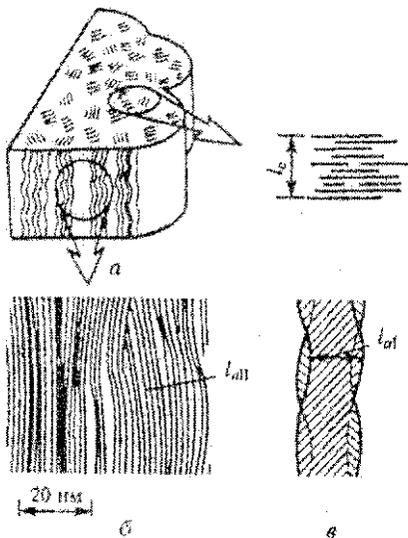


Рис. 4.1. Структура углеродных волокон (схема):  
*a* — общий вид; *б* — продольное сечение фибриллы; *в* — поперечное сечение микрофибриллы;  
 $l_a$  и  $l_c$  — поперечные размеры микрофибрилл

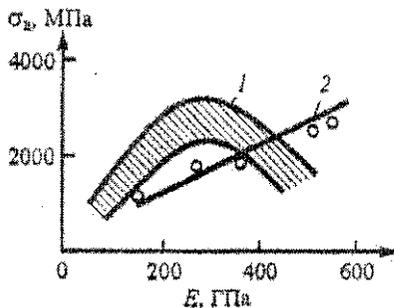


Рис. 4.2. Связь между временным сопротивлением и модулем упругости углеродных волокон при различном исходном сырье:  
 / - ПАН; 2 - вискоза

Структура и свойства углеродных волокон в большей степени зависят также от температуры термической обработки синтетических волокон (рис 4.3). Кроме того, прочность углеродных волокон сильно зависит от наличия таких дефектов, как пустоты, трещины. Она значительно снижается, если размеры дефектов превышают 0,05 мкм. При нагреве выше 450 °С на воздухе углеродные волокна окисляются, в восстановительной и нейтральной среде сохраняют свои механические свойства до 2200 °С.

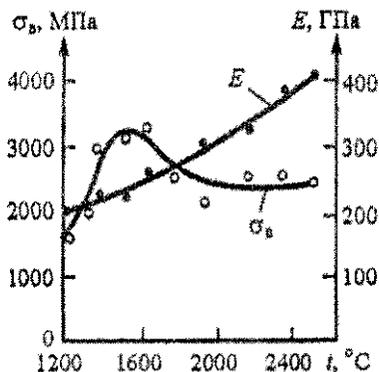


Рис. 4.3. Влияние температуры графитизации на свойства углеродного волокна

К другим достоинствам углеродных волокон относятся высокая теплопроводность, электрическая проводимость, коррозионная стойкость, стойкость к тепловым ударам, низкие коэффициенты трения и линейного расширения; к недостаткам относятся плохая смачиваемость расплавленными материалами, используемыми в качестве матриц. Для улучшения смачиваемости и уменьшения химического взаимодействия с матрицей на углеродные волокна наносят покрытия. Хорошие результаты в контакте с алюминиевой матрицей показывают покрытия из боридов титана и циркония.

Керамические волокна оксидов, нитридов, карбидов характеризуются высокими твердостью, прочностью, модулем упругости, относительно небольшой плотностью и высокой термической стабильностью.

Из табл. 4.1 видно, что особо высокие прочность и жесткость присущи нитевидным монокристаллам («усам»). Высокая прочность объясняется совершенством их структуры, для которой характерна очень малая плотность дислокаций. Доказано, что скручивание усов в процессе образования монокристаллов  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$  вызвано наличием в них единственной винтовой дислокации, расположенной вдоль оси роста кристаллов.

Стекловолокно характеризуется сочетанием высокой прочности ( $\sigma_s = 3000...5000$  МПа), теплостойкости, диэлектрических свойств, низкой теплопроводности, высокой коррозионной стойкости. Стекловолокно получают продавливанием стекломассы через специальные фильтры или вытягиванием из расплава. Изготавливаются два вида стекловолокна: непрерывное - диаметром

3-100 мкм, длиной 20 км и более и штатное - диаметром 0,5-20 мкм, длиной 0,01-0,5 м. Штатные волокна применяют для изготовления конструкционных материалов КМ с однородными свойствами, а также теплоизоляционных КМ; непрерывные - в основном для высокопрочных КМ на неметаллической основе. Выпускаемые в настоящее время непрерывные профильные волокна с квадратной, прямоугольной, шестиугольной формой поперечного сечения повышают прочность и жесткость КМ благодаря более плотной упаковке в материале.

Таблица 4.1

Свойства волокон и нитевидных монокристаллов

Материал	Температура плавления или размягчения, °С	$\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_w/(\rho g)$ , км	$E$ , ГПа	Средний диаметр волокна, мкм
<b>Волокна</b>						
Углерод или графит	3650	1,6-2	1687-3374	110-210	216-677	5,8-7,6
Бор на вольфрамовой проволоке	2300	2,63	2707-4060	110-160	373-402	102-142
Борсик на вольфрамовой проволоке	2300	2,77	2707-4060	100-160	373-412	104
Карбид кремния на вольфрамовой проволоке	2200	3,35-3,46	2236-3893	67-120	492-471	102
Оксид алюминия Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2040	3,14	2030	66	169	3
Стекло	—	2,5	4482	183	89,3	—
Бериллий	1284	1,85	981-1100	38-54	295	125-130
Вольфрам	3410	19,3	1657-3207	9-17	420	51-1270
Сталь 18X15H5AM3	—	7,8	3500-3800	48	200	150
<b>Нитевидные монокристаллы</b>						
Сапфир, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2040*	3,96	4021-23634	110-620	402-1010	0,51-11
Карбид кремния	2690*	3,22	13533-40600	440-1320	441-1010	0,51-11

Температура разложения.

Применение полых профильных волокон уменьшает пластичность, повышает жесткость при изгибе и прочность при сжатии КМ, улучшает их изоляционные свойства.

## **Вопросы**

1. Что представляют собой упрочнители и из какого материала их изготавливают?
2. Каким образом получают КМ с алюминиевой матрицей?
3. Для чего наносят покрытия на упрочнители?
4. Что можете сказать о жаропрочных упрочнителях?
5. Как получают бериллиевую проволоку?
6. Какой структурой и свойствами обладают борные волокна?
7. Каковы прочность и свойства углеродных волокон, как их получают?
8. Объясните, что такое «микрофибрилл»?
9. Опишите достоинства и недостатки углеродных волокон?
10. Что знаете о керамических волокнах?
11. Что представляют собой «усы»?
12. Опишите свойства и прочность стекловолокна?

## **Порядок выполнения работы**

1. Изучить инструкцию по технике безопасности при выполнении работ.
2. Изучить изложенный материал.
3. Ответить на вопросы в письменном виде в форме отчета по лабораторной работе.
4. Отчет представляет собой ответы на вопросы, подкрепленные рисунками и графиками.
5. Отчет готовится отдельно каждым студентом и является допуском для защиты. Успешная защита отчета является основанием для зачета по каждой лабораторной работе.