

Композиционные материалы

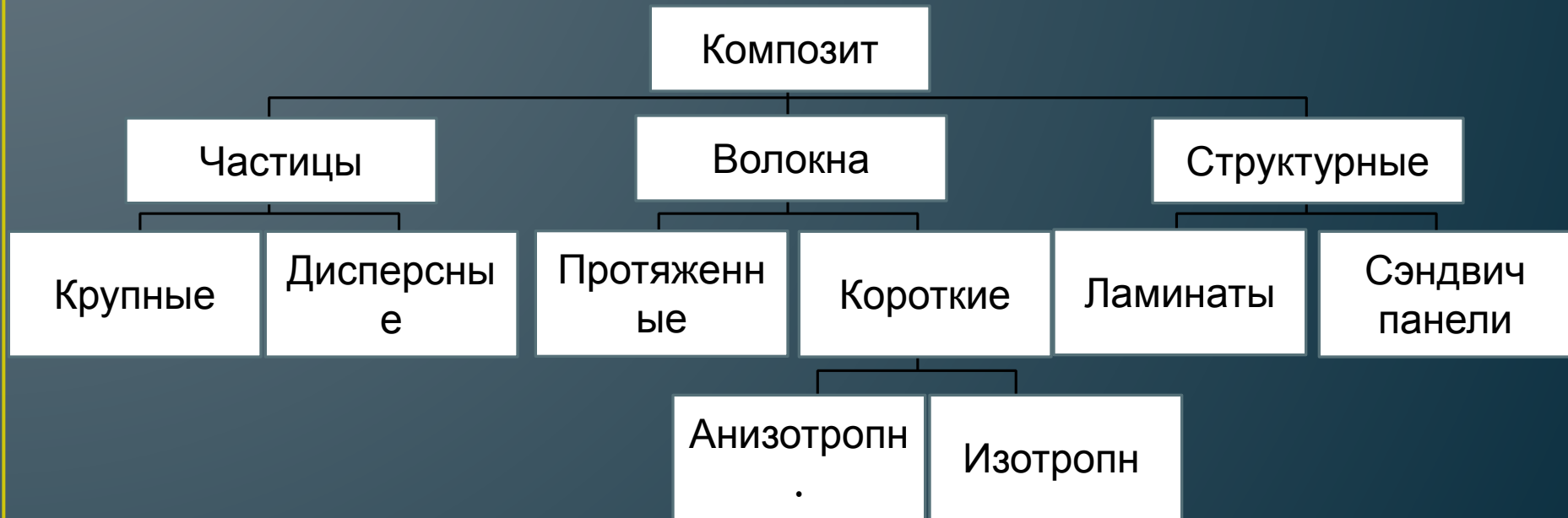
Часть 2, курс лекций: «Стеклокристаллические и композиционные материалы на основе стекла» для магистрантов



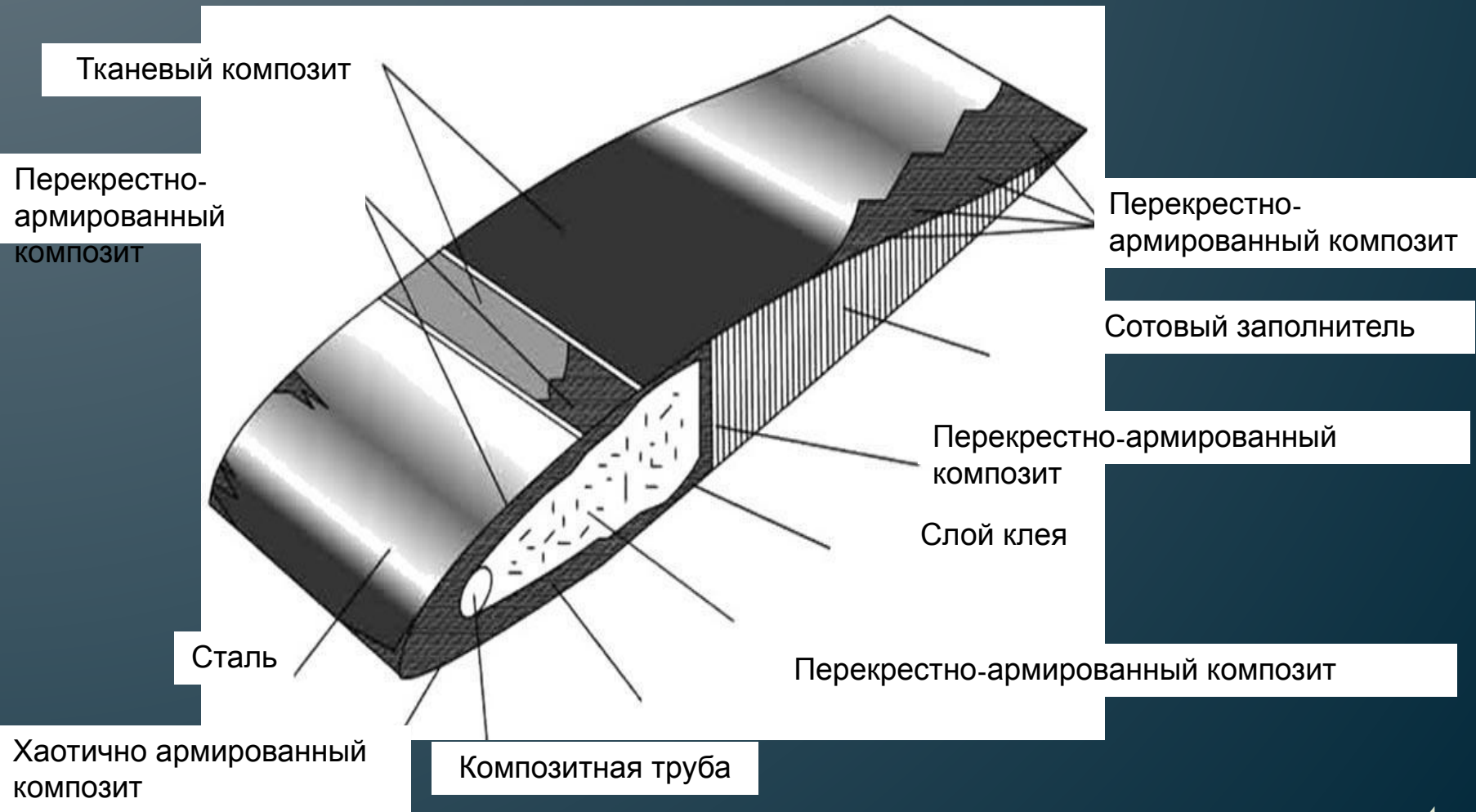
Основные свойства и механизмы упрочнения КМ

Лекция 3

Основные виды композитов

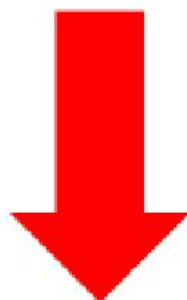


Использование композитов позволяет: Создавать конструкции с нужными свойствами в заданных направлениях



Свойства композиционных материалов

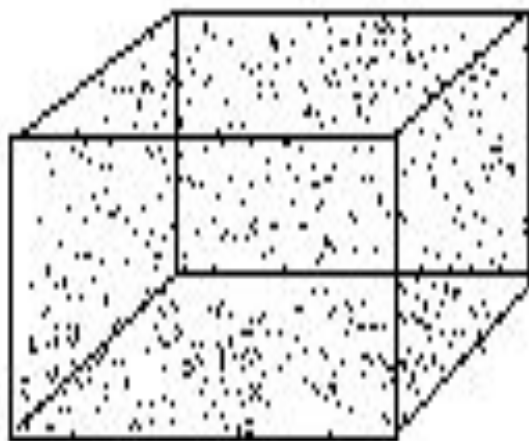
- В композиционных материалах разнородные компоненты создают синергетический эффект - новое качество материала, отличное от свойств исходных компонентов, т.е. когда «целое больше, чем сумма составных частей»
- Сочетание разнородных веществ приводит к созданию нового материала, свойства которого существенно отличаются от свойств каждого из его составляющих.
- Признаком композиционного материала является заметное взаимное влияние составных элементов композита, т.е. их новое качество, эффект.
- Варьируя состав матрицы и наполнителя, их соотношение, применяя специальные дополнительные реагенты и т.д., получают широкий спектр материалов с требуемым набором свойств



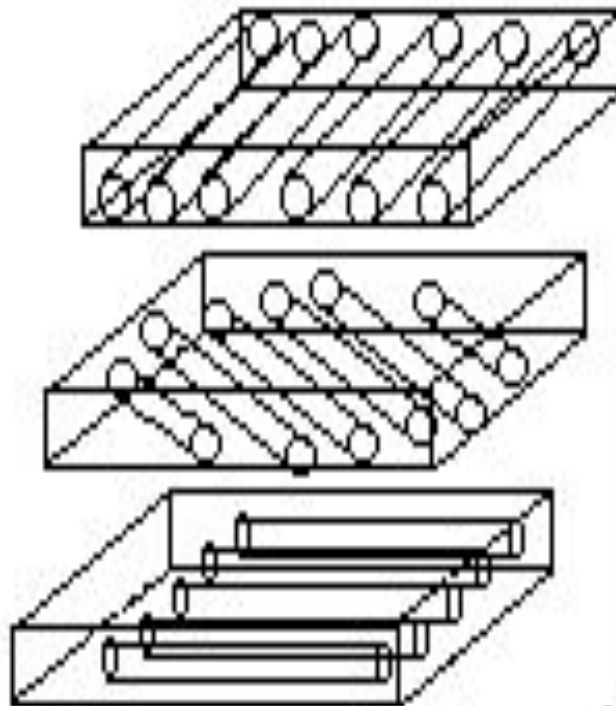
Свойства композита зависят от:

- Свойств компонентов (матрицы и наполнителя)
- Их соотношения
- Геометрии армирования
- Свойств границы раздела

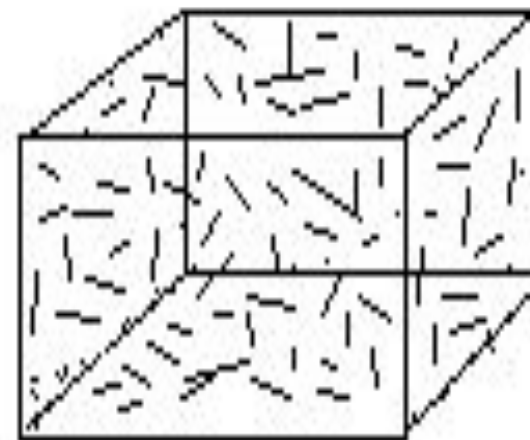
Способы распределения дисперсных и волокнистых наполнителей в композите



Частицы



Непр. волокна



Короткие волокна

Расчет свойства композиционного материала

Правило смесей

Пусть m_c , m_f , m_m – масса композита, волокна и матрицы, соответственно

V_c объем композита, V_m – объем матрицы, V_f – объем волокна

Пусть ρ_c , ρ_f , ρ_m – плотность композита, волокна и матрицы, соответственно

$$m_c = m_f + m_m \quad V_c \rho_c = V_m \rho_m + V_f \rho_f$$

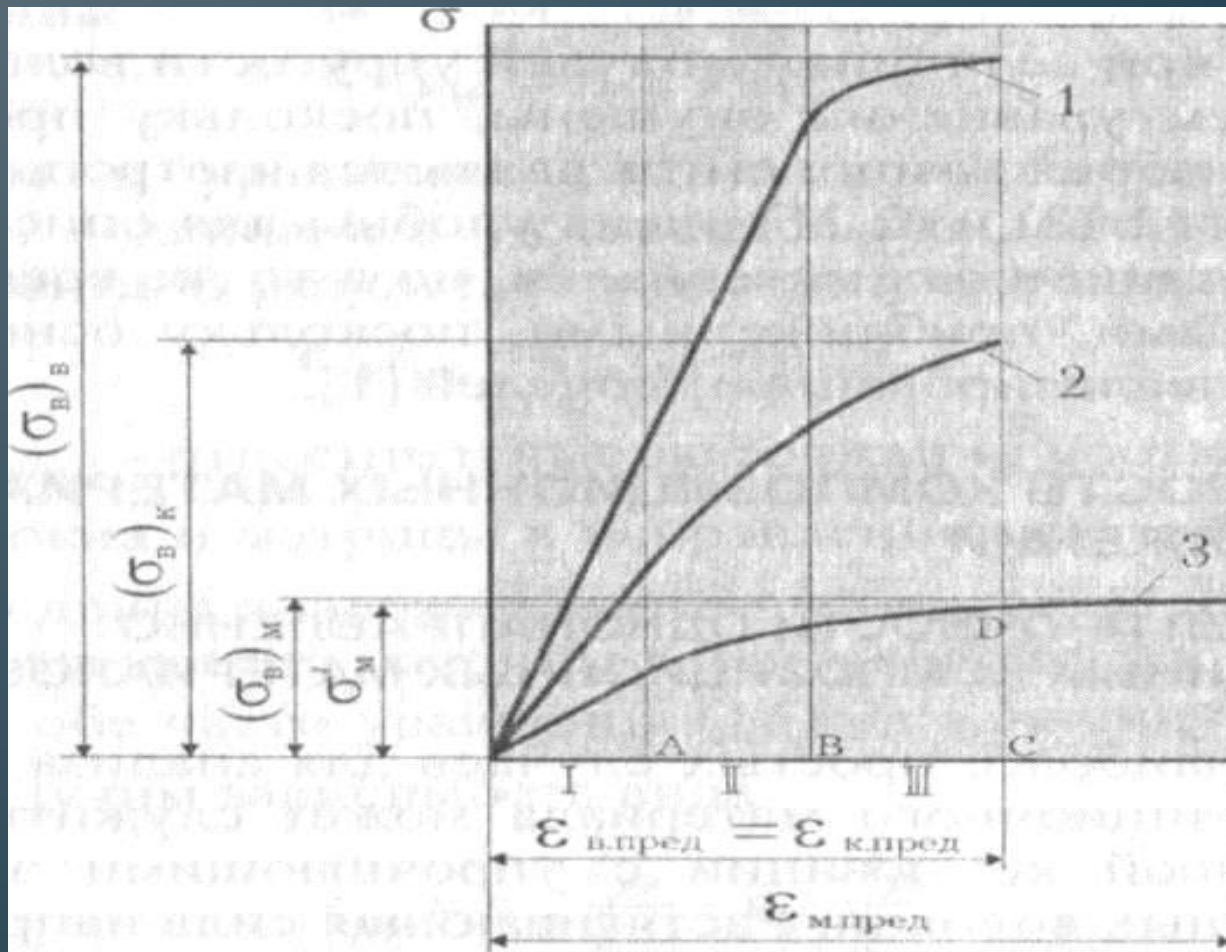
$$\rho = \frac{V_f \rho_f}{V_c} + \frac{V_m \rho_m}{V_c}$$

$v_f / V = v_f$ - объемная доля волокна

$$\rho_c = v_f \rho_f + v_m \rho_m$$

$$\chi_c = \chi_f + \chi_m$$

Диаграмма растяжения волокон (1), матрицы (3) и однонаправленного КМ (2)



Зависимость модуля упругости композита от объемной доли волокнистого наполнителя

Свойства композиционных материалов в основном определяются физико-химическими свойствами компонентов (матрицы и наполнителя), прочностью связи между ними и объемным соотношением матрицы и наполнителя.

Так, модуль упругости волокнистого композита E_c при нагружении вдоль направления волокон описывается правилом смеси, представляющим собой линейную комбинацию модуля упругости волокон E_f и матрицы E_m :

$$E_c = E_f V_f + (1 - V_f) E_m,$$

где V_f – объемная доля волокнистого наполнителя. Модуль упругости композита при нагружении в поперечном направлении описывается формулой:

$$E_c = [V_f / E_f + (1 - V_f) / E_m]^{-1}$$

Основные особенности композитов по сравнению

Анизотропия

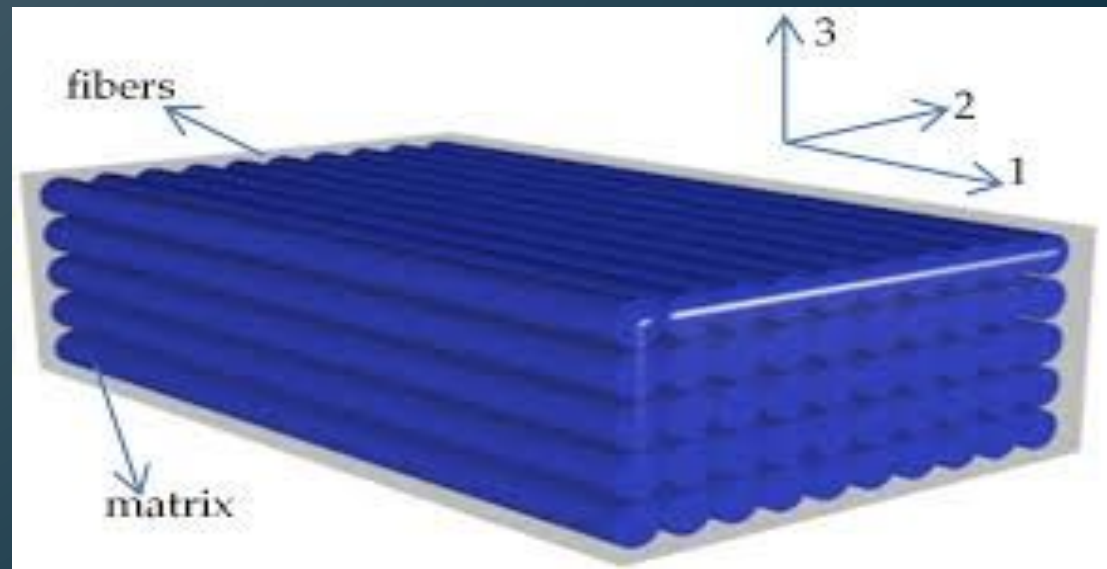
Металлические материалы и сплавы, традиционные для машиностроения, обычно демонстрируют одинаковые свойства в различных направлениях, то есть они изотропны. Изотропны дисперсно-упрочненные и ХАСП композиты.

Свойства волокнистых композитов заметно зависят от направления измерения, то есть эти материалы ярко выраженной анизотропией

Однонаправленный композит

У однонаправленного волокнистого композита все волокна расположены в одном направлении – ***продольное направление.***

Направление, перпендикулярное продольному называют поперечным или ***трансверсальным.***



Удельная прочность и удельный модуль

Удельная прочность – это характеристика прочности материала (то есть его способности выдерживать внешние нагрузки, не

Удельный модуль – это характеристика жесткости материала (то есть его способности выдерживать внешние нагрузки, не меняя существенным образом

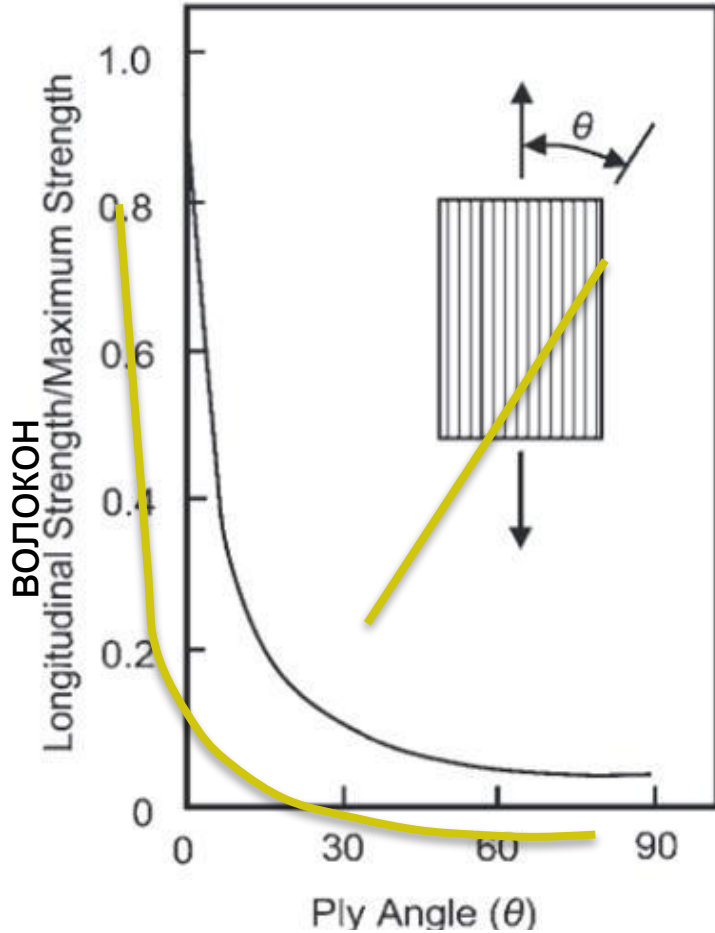
$$\text{Удельная прочность} = \frac{\text{Прочность}}{\text{Плотность}}$$

$$\text{Удельный модуль} = \frac{\text{Модуль}}{\text{Плотность}}$$

Основное преимущество композитов по сравнению со сталями и сплавами - высокие значения удельной прочности и удельного модуля

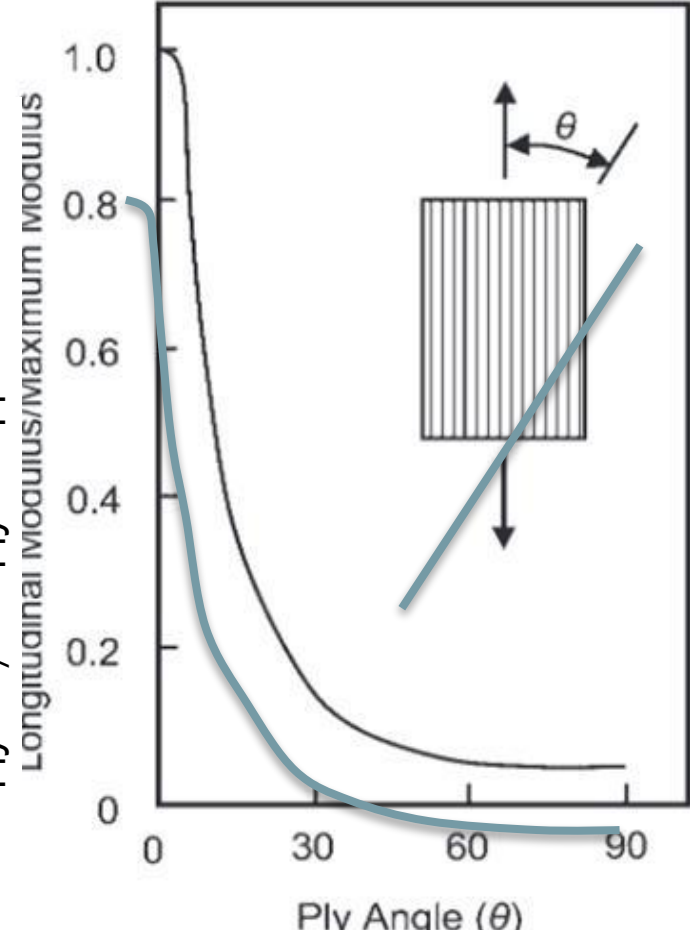
Анизотропия.

Прочность / Прочность вдоль
ВОЛОКОН



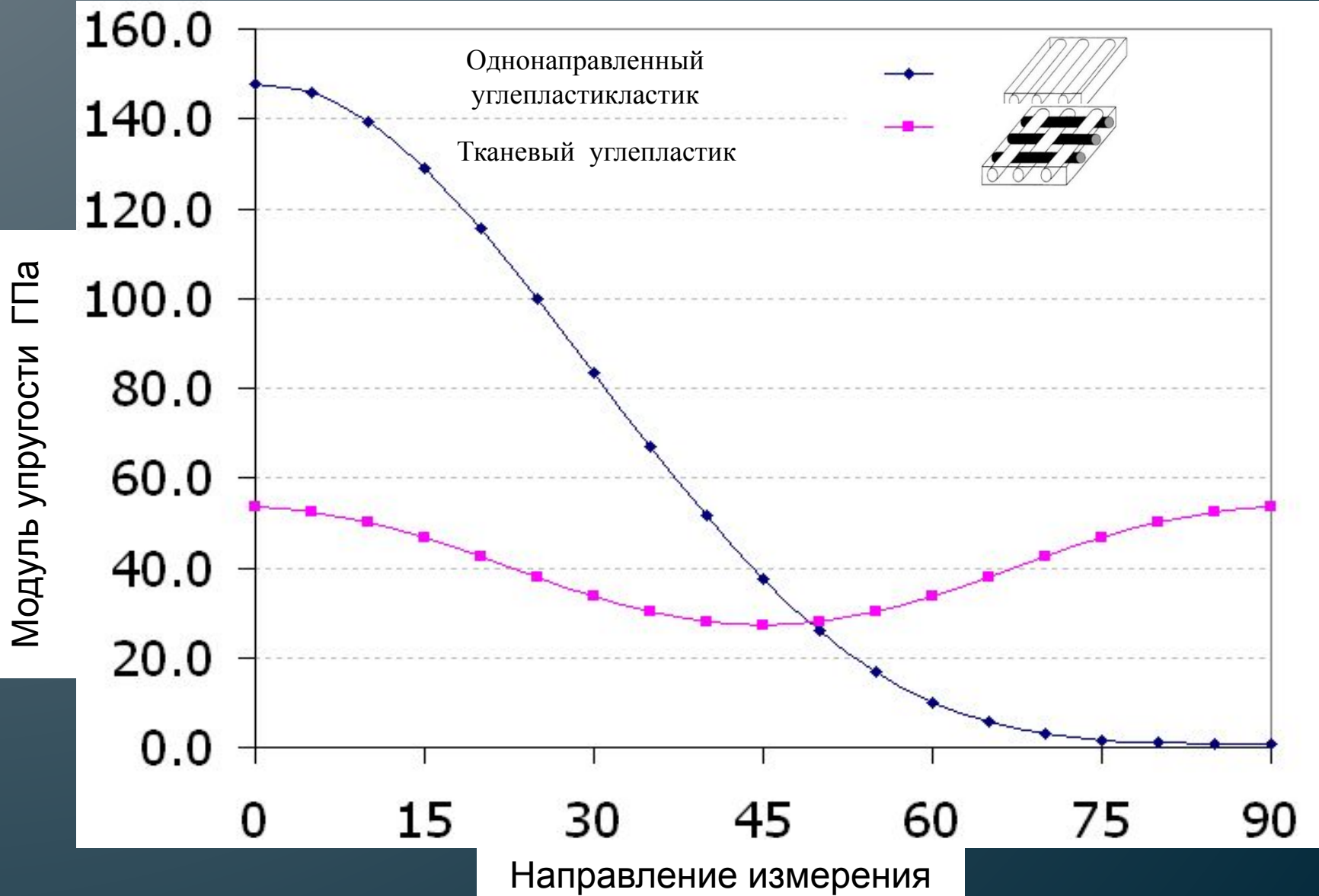
Направление
измерения,
задаваемое углом θ

Модуль / Модуль вдоль волокон



Направление
измерения,
задаваемое углом θ

Анизотропия



Удельная прочность и удельный модуль.

Материал	Плотность, г/см ³	Модуль упругости*, ГПа	Прочность при растяжении*, МПа
Традиционные материалы			
SAE 1010 сталь	7.87	207	365
AISI 4340 сталь	7.87	207	1722
6061-T6 алюминиевый сплав	2.70	68.9	310
7178-T6 алюминиевый сплав	2.70	68.9	606
Ti-6Al-4V титановый сплав	4.43	110	1171
17-7 PH нержавеющая сталь	7.87	196	1619
INCO 718 никелевый сплав	8.20	207	1399
Композиты			
Высокопрочный углепластик (однаправленный)	1.55	137.8	1550
Высокомодульный углепластик (однаправленный)	1.63	215	1240
E-glass стеклопластик (однаправленный)	1.85	39.3	965
Kevlar 49 (однаправленный)	1.38	75.8	1378
Волокна бора - 6061 Al сплав	2.35	220	1109
Квази-изотропный углепластик	1.55	45.5	579
ХАСП (изотропный материал)	1.87	15.8	164

Удельная прочность и удельный модуль

Высокомодульный углепластик на основе эпоксидной матрицы:

Модуль упругости
вдоль волокон = 215
ГПа
Плотность = 1,63
г/см³
УДЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ = 132
МН·м/кг

Углеродистая сталь SAE 1010:

Модуль упругости = 207
ГПа
Плотность = 7,87
г/см³
УДЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ = 26
МН·м/кг

Удельный модуль высокомодульного углепластика практически в 5 раз выше удельного модуля углеродистой стали!

Удельная прочность и удельный модуль.

Кевлар 49:

Предел прочности
вдоль волокон = 1378
МПа
Плотность = 1,38
г/см³
УДЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ = 999
кН·м/кг

Никелевый сплав INCO 718:

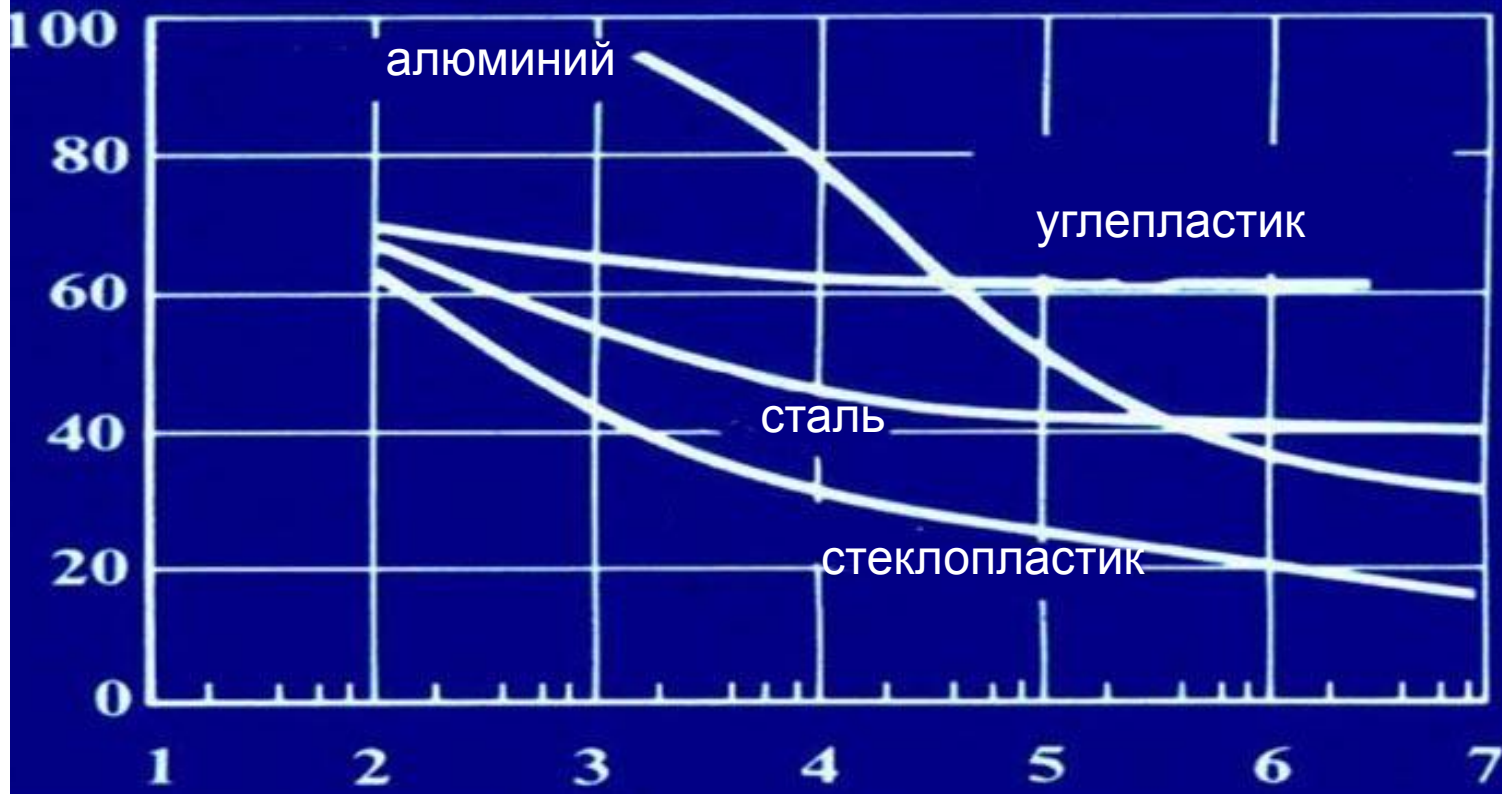
Предел прочности = 1399
МПа
Плотность = 8,2
г/см³
УДЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ = 171
кН·м/кг

Удельная прочность Кевлара 49 почти в 6 раз выше удельной прочности никелевого сплава INCO 718!

Сопротивление усталости

Кривые усталости некоторых материалов

Процентная доля от предела прочности при растяжении, %



Число циклов до разрушения (log)

Углепластик великолепно сопротивляется усталости!

Свойства композиционных материалов зависят не только от физико-химических свойств компонентов, но и от прочности связи между ними.

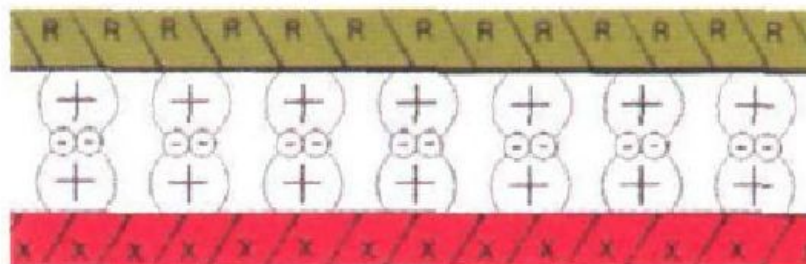
Границы раздела, взаимодействие разной природы волокна с матрицей, определяют уровень свойств композитов и их постоянство в условиях эксплуатации.

Максимальная прочность достигается, если между матрицей и арматурой происходит образование твердых растворов или химических соединений.

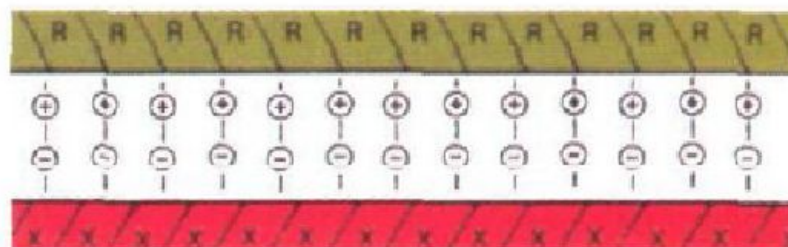
- Первостепенное значение для любого композиционного материала имеет вопрос о границе раздела между матрицей и наполнителем. Его важность обусловлена тем, что состояние указанной границы раздела определяет эффективность (или неэффективность) армирования композита тем или иным наполнителем.
- В общем случае эта поверхность раздела по своему химическому составу и физико-механическим свойствам отличается от таковых для матрицы и армирующего элемента. Тогда можно дать следующее определение: граница (или поверхность) раздела между матрицей и наполнителем – это область изменения химического состава и физико-механических свойств (плотность, прочность, модуль упругости) композита. Она обеспечивает связь матрицы с армирующим элементом, необходимую для передачи и распределения нагрузки между составляющими композита.

ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ МЕЖФАЗНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АРМИРУЮЩИЙ МАТЕРИАЛ - МАТРИЦА

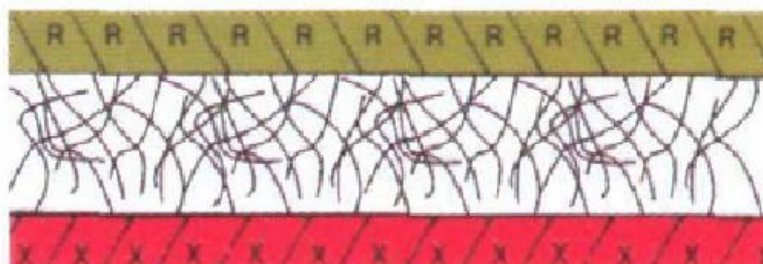
КОВАЛЕНТНЫЕ СВЯЗИ



ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ



ПЕРЕПЛЕТЕНИЕ
МАКРОМОЛЕКУЛ

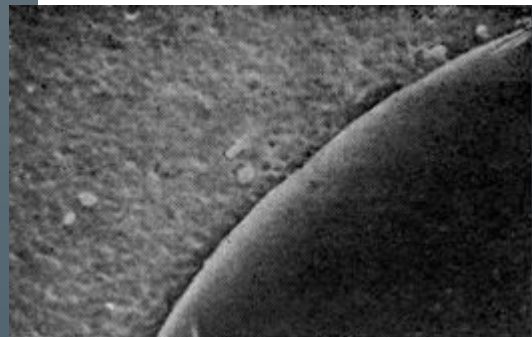


МЕХАНИЧЕСКОЕ
СЦЕПЛЕНИЕ

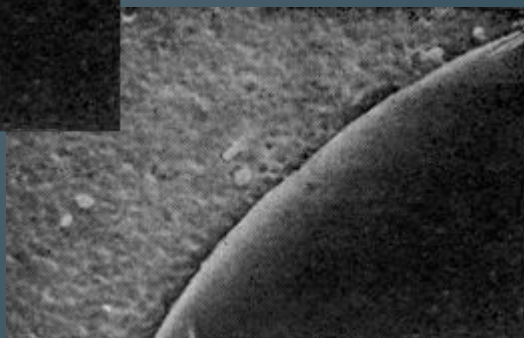


Влияние условий эксплуатации

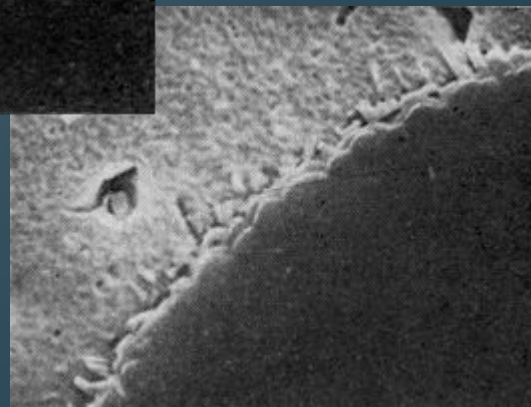
изотермическая выдержка при 499°С



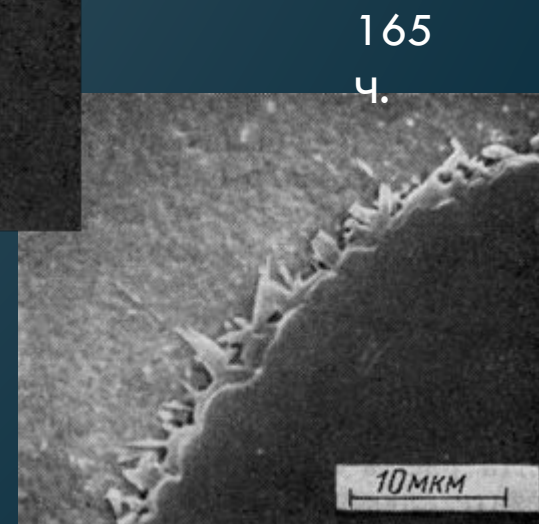
0,5
ч.



5
ч.



12
ч.



165
ч.

КОМПОЗИТ
Al-B(ВОЛОКНО)

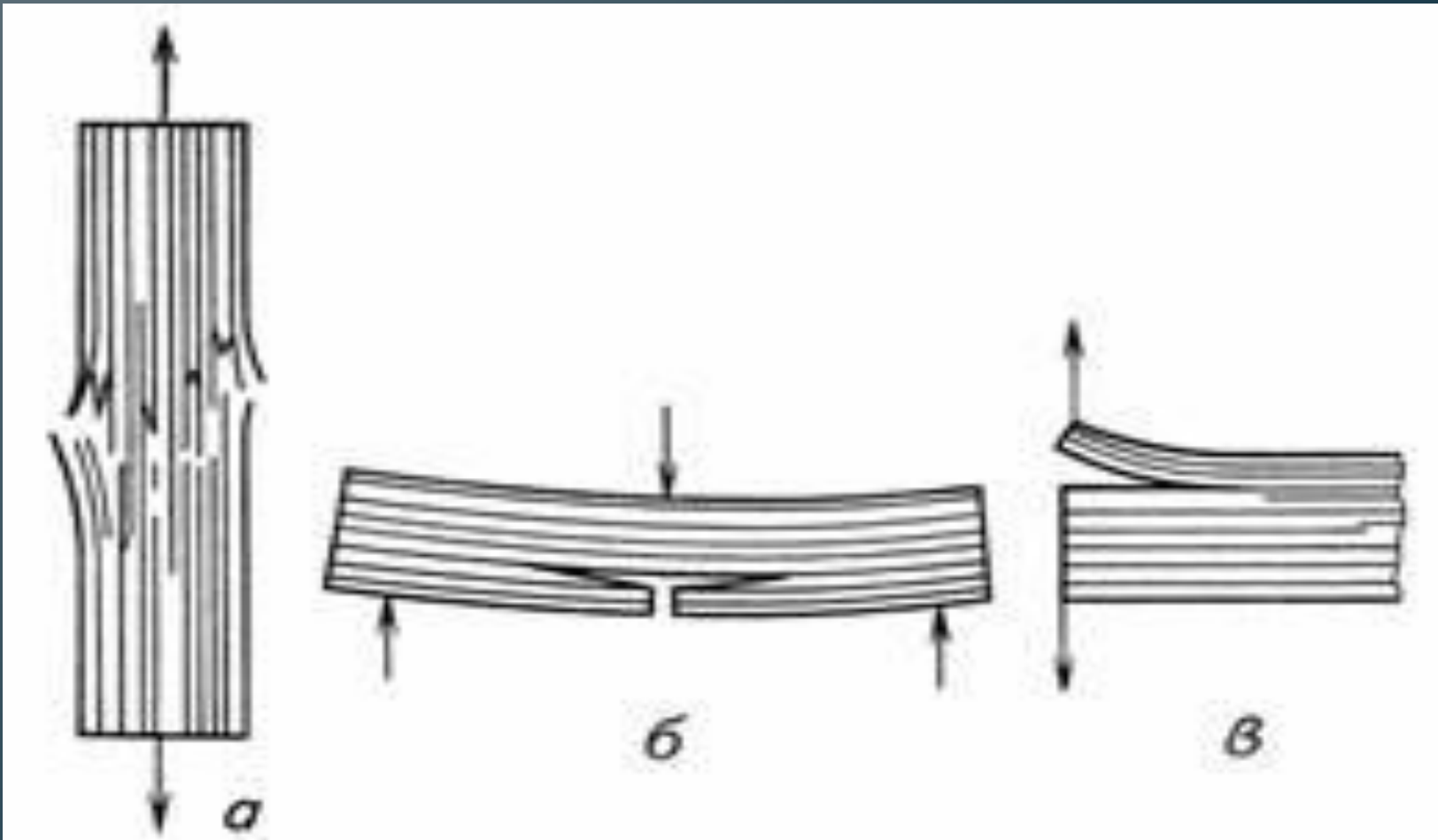
РАЗРУШЕНИЕ КМ

Важнейшей характеристикой поведения конструкционных материалов является их трещиностойкость. Трещины, поры или другого рода несплошности в реальных конструкциях есть всегда, вопрос заключается лишь в размерах и устойчивости этих дефектов.

- Важнейшим достоинством КМ является эффективное перераспределение напряжений при разрушении отдельных волокон. Благодаря этому обеспечивается высокий уровень вязкости разрушения композитов.
- Для разрушения КМ характерен ряд особенностей. Одна из них заключается в том, что показатели вязкости разрушения композитов в значительной степени определяются направлением развития трещины. В анизотропном КМ выделяются направления, обеспечивающие высокий и низкий уровень трещиностойкости.
- Трещина легко развивается вдоль границ сопряжения

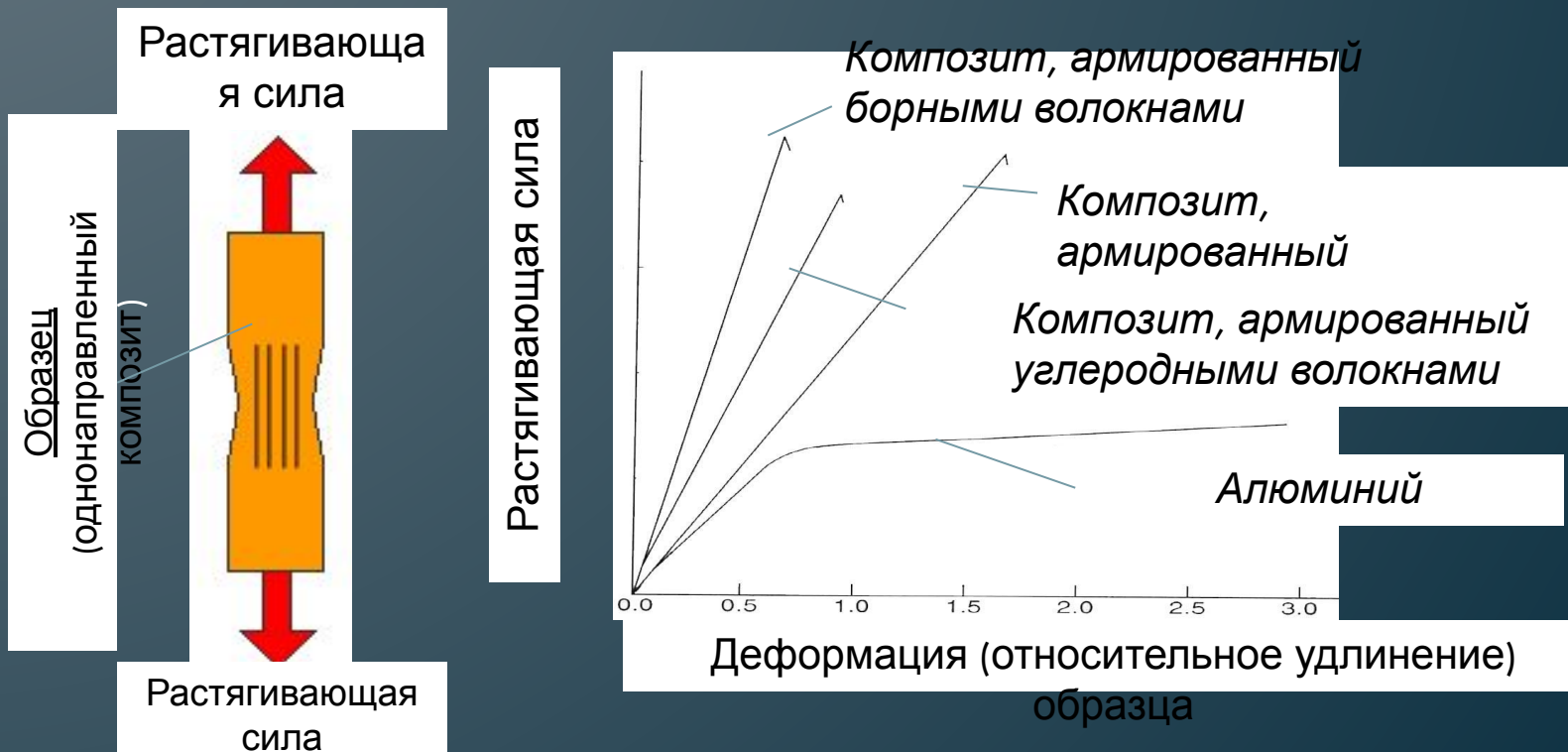
- Если же трещина развивается поперек волокон, то возможно достижение высоких значений трещиностойкости материала. В этой связи характер армирования должен четко соответствовать напряженному состоянию, реализующемуся во время эксплуатации изделия, изготовленного из композиционного материала.
- К важнейшим технологическим дефектам КМ относят расслоения, возникающие на стадиях изготовления, транспортировки и эксплуатации материалов и изделий из них. Дефекты подобного рода могут быть вызваны температурными напряжениями, ударами, другими видами локального нагружения. Поверхностное отслоение характеризуется выпучиванием некоторого объема материала. Некоторые примеры отслоений в слоистых композиционных материалах показаны на рисунке

Типы разрушения слоистых композитов: щеткообразное, продольное при изгибе и межслоевое растрескивание



Механизм деформирования и разрушения

Диаграммы растяжения некоторых композитов и алюминия

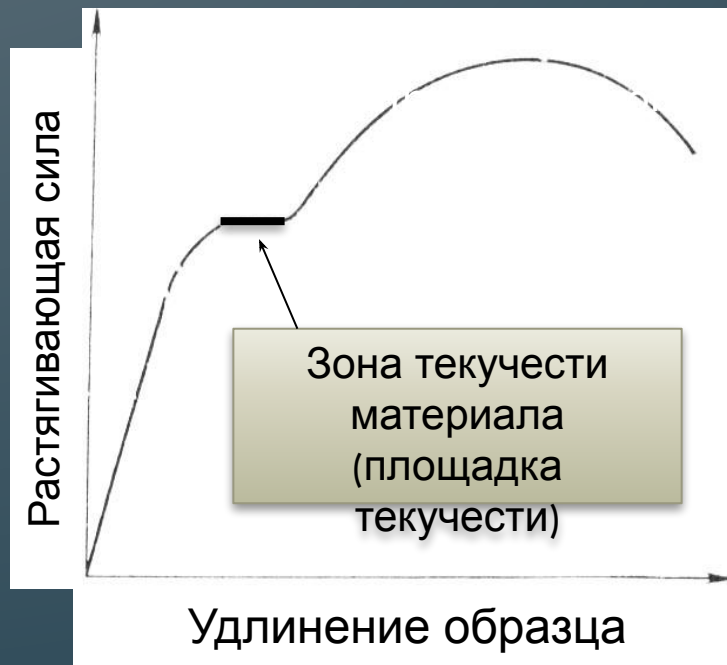


При растяжении вдоль волокон композиты демонстрируют хрупкое поведение (деформации не превышают 2%) в отличие от сталей и сплавов, являющихся пластичными материалами (деформации сталей могут достигать 50%, то есть образец удлиняется в 1,5 раза)

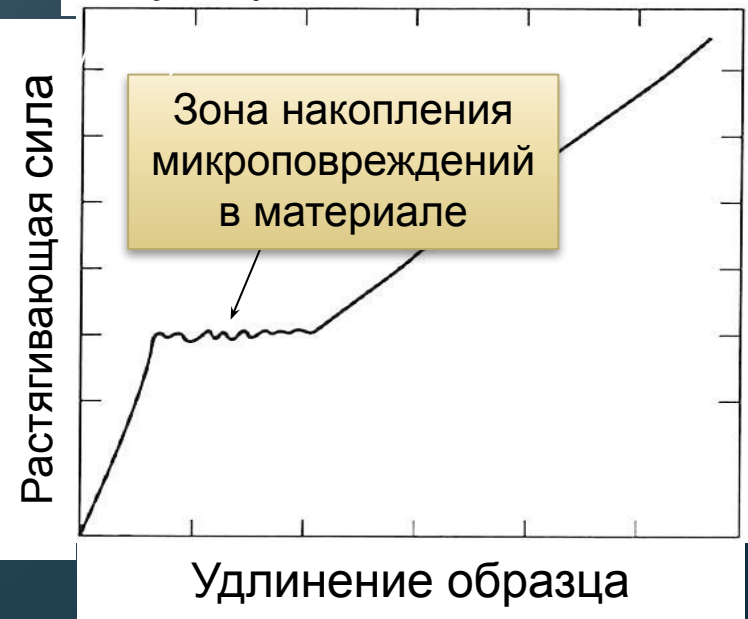
Механизм деформирования и разрушения

Диаграммы растяжения малоуглеродистой стали и гибридного КОМПОЗИТА

Малоуглеродистая сталь

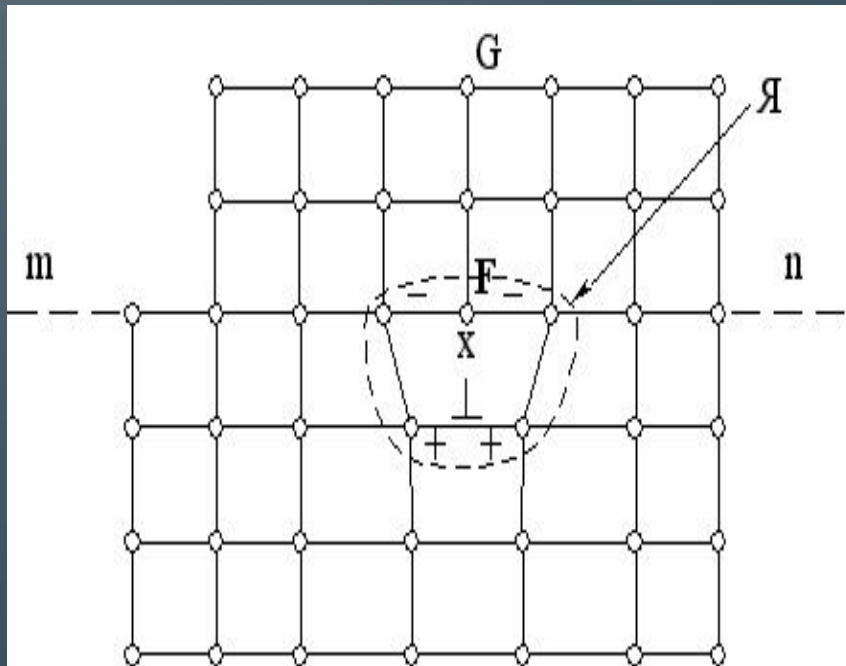


Полимерный композит, армированный стеклянными и углеродными волокнами

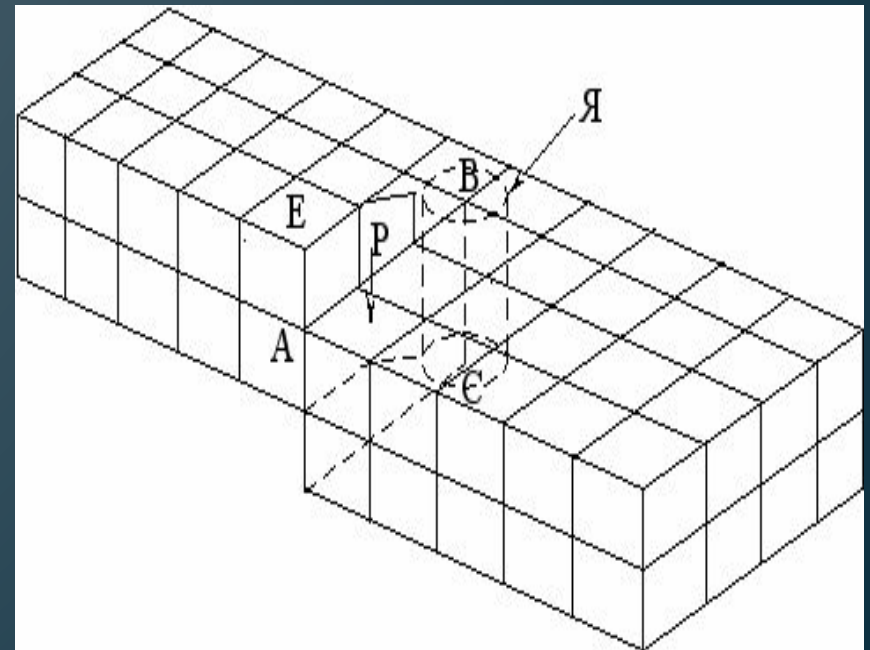


Зарождение трещин с позиции теории дислокаций

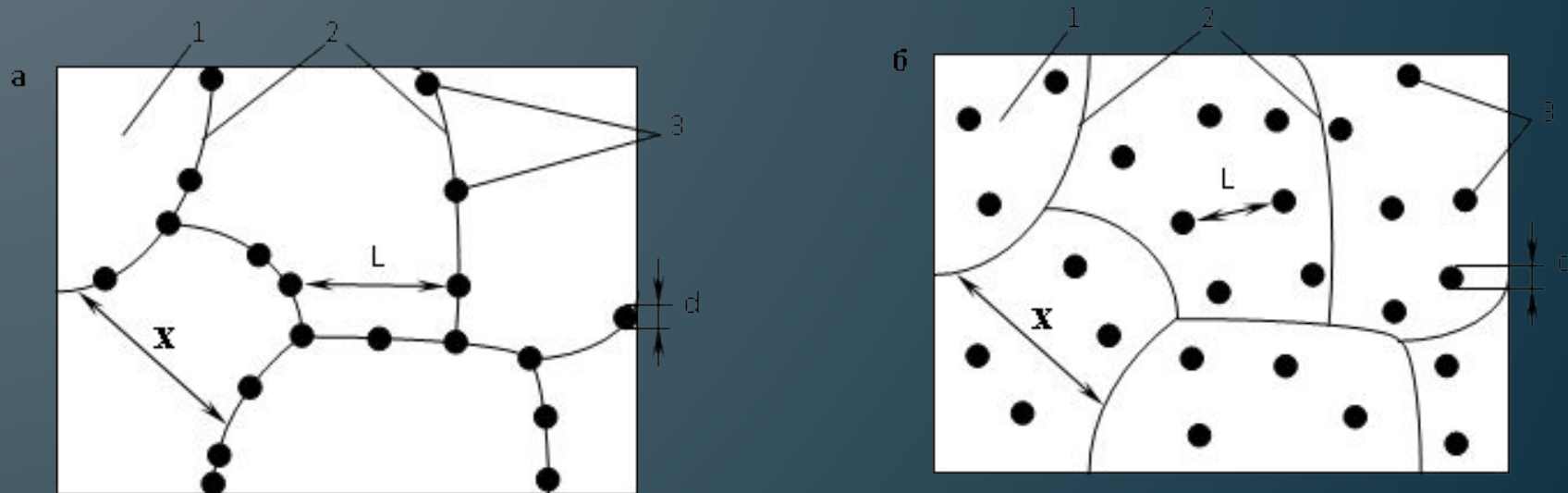
Схематическое представление краевой дислокации



Схематическое представление винтовой дислокации

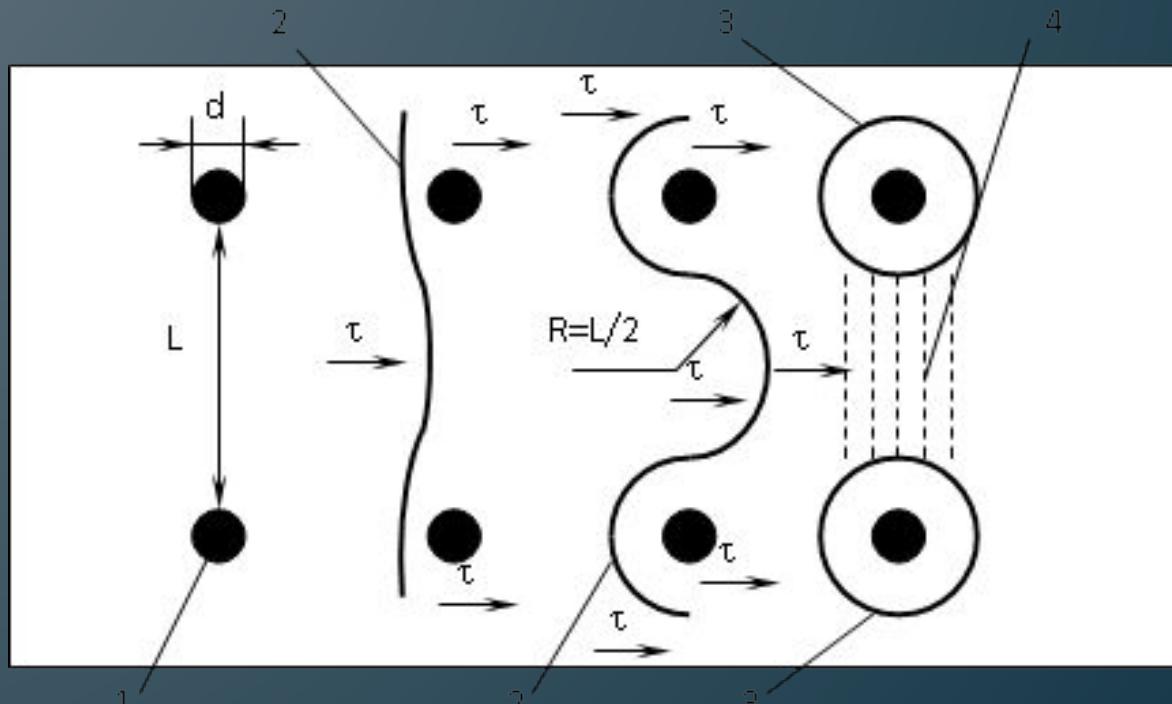


Пластичная матрица - хрупкий дисперсный наполнитель



Агрегатная (а) и дисперсная (б) структура
1 – зерно матрицы; 2 – межзеренные границы; 3 – дисперсные частицы наполнителя; x – размер зерна матрицы; d – размер частицы наполнителя; L – расстояние между соседними частицами наполнителя.

Пластичная матрица - хрупкий дисперсный наполнитель

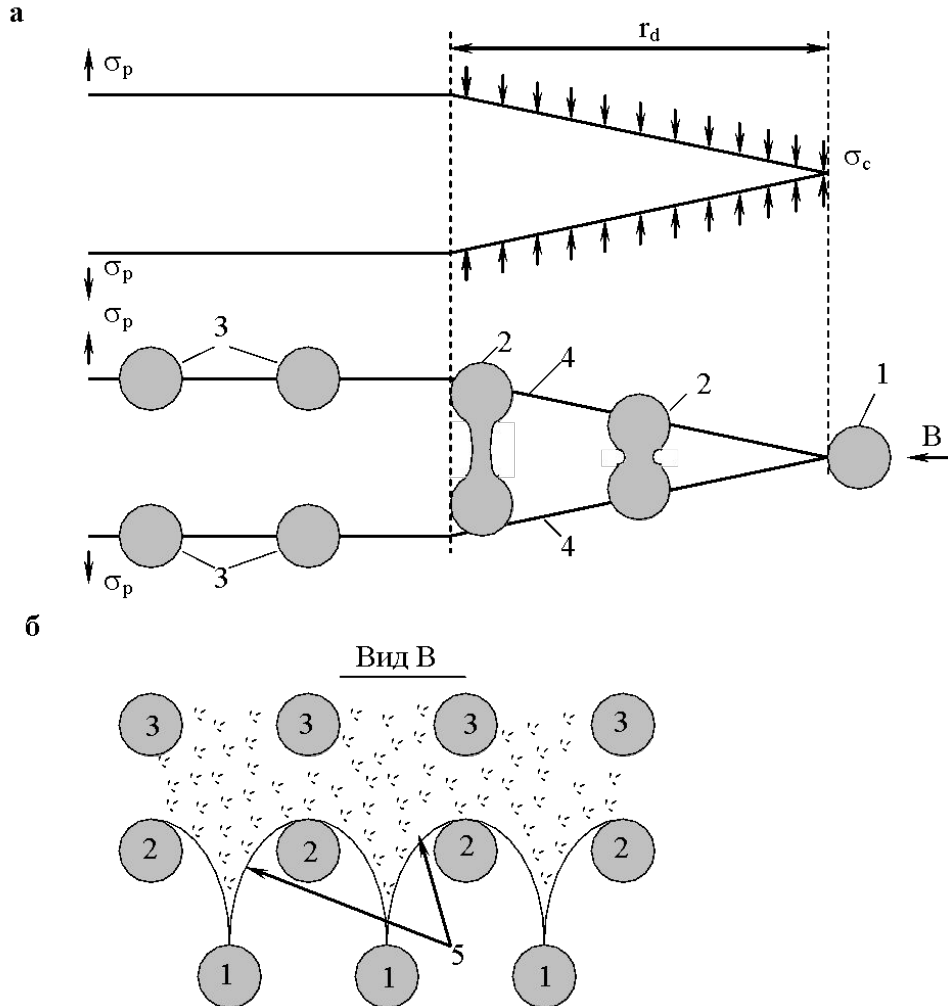


Схематическое изображение процесса формирования дислокационных петель в пластичной матрице.

1 – дисперсные частицы; 2 – линии дислокаций; 3 – дислокационные петли; 4 – поле упругих напряжений; d – размер частицы наполнителя; L – расстояние между соседними частицами наполнителя; τ – направление действия касательных напряжений.

- Механизм упрочнения композиционные материалы «пластичная матрица – хрупкий наполнитель».
- Упрочнение идет по дислокационному механизму: если расстояние между частицами достаточно, то дислокация под действием касательного напряжения выгибается между ними, ее участки смыкаются за каждой частицей, образуя вокруг частиц петли. В областях между дислокационными петлями возникает поле упругих напряжений, затрудняющее проталкивание новых дислокаций между частицами. Этим достигается повышение сопротивления зарождению (инициированию) трещины.
- Для этого типа материалов матрица может быть представлена, например, следующими металлами: Al, Ag, Cu, Ni, Fe, Co, Ti. В качестве наполнителя чаще всего выбираются соединения из оксидов (Al_2O_3 ; SiO_2 ; Cr_2O_3 ; ThO_2 ; TiO_2), карбидов (SiC ; TiC), нитридов (Si_3N_4 ; AlN), боридов (TiB_2 ; CrB_2 ; ZrB_2).

Хрупкая матрица – пластичный дисперсный наполнитель

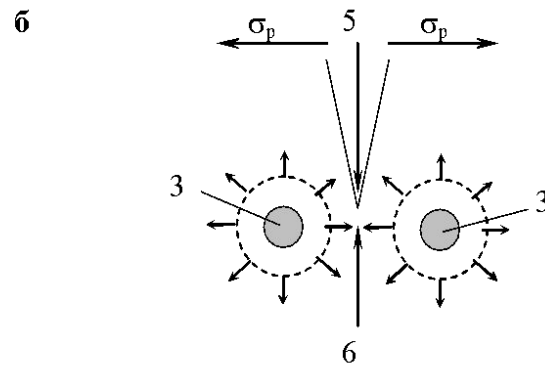
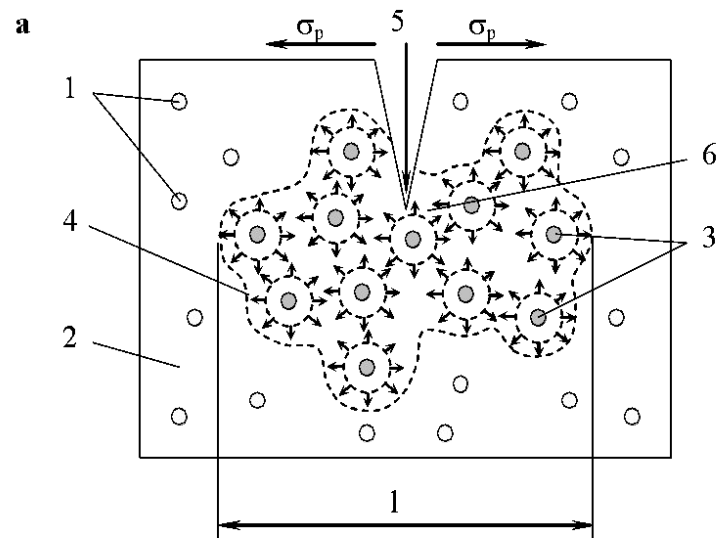


1 – металлические частицы перед фронтом трещины (5);
2 – «мостики связи» образованные деформированными металлическими частицами;
3 – разрушенные металлические частицы;
4 – берега трещины;
 r_d – длины зоны мостиков связи;
 σ_p – растягивающие напряжения.

- Процесс разрушения таких композитов можно разделить на две стадии.
- На первой стадии в ходе нагружения сначала инициируется хрупкое разрушение в матрице вследствие повышенной концентрации напряжений на микронеоднородностях ее структуры: микропорах, границах зерен, крупных неравноосных зернах. При достижении некоторого критического уровня напряжений происходит старт трещины.
- На второй стадии распространяющаяся трещина взаимодействует с пластичными металлическими частицами : у ее вершины действуют максимальные напряжения, которые приводят к деформации, удлинению и разрыву металлических частиц. При этом работа разрушения композита существенно возрастает по сравнению с таковой характеристикой для неармированного материала. Это происходит за счет затрат энергии трещины на работу пластической деформации всех частиц, попадающих во фронт трещины. В результате сопротивление развитию трещины повышается, поскольку ее берега перекрываются «мостиками связи» из пластичного металла.
- В качестве керамической фазы могут использоваться тугоплавкие оксиды и угоплавкие неоксидные соединения: Al_2O_3 , $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$

Хрупкая матрица – хрупкий дисперсный наполнитель

1 – частицы $t\text{ZrO}_2$;
2 – хрупкая матрица;
3 – частицы ZrO_2 , претерпевшие $t\text{-m}$ переход;
4 – зона возмущения (process zone);
5 – вершина трещины;
6 – поле сжимающих напряжений;
 σ_p – напряжения приложенные к берегам трещины.

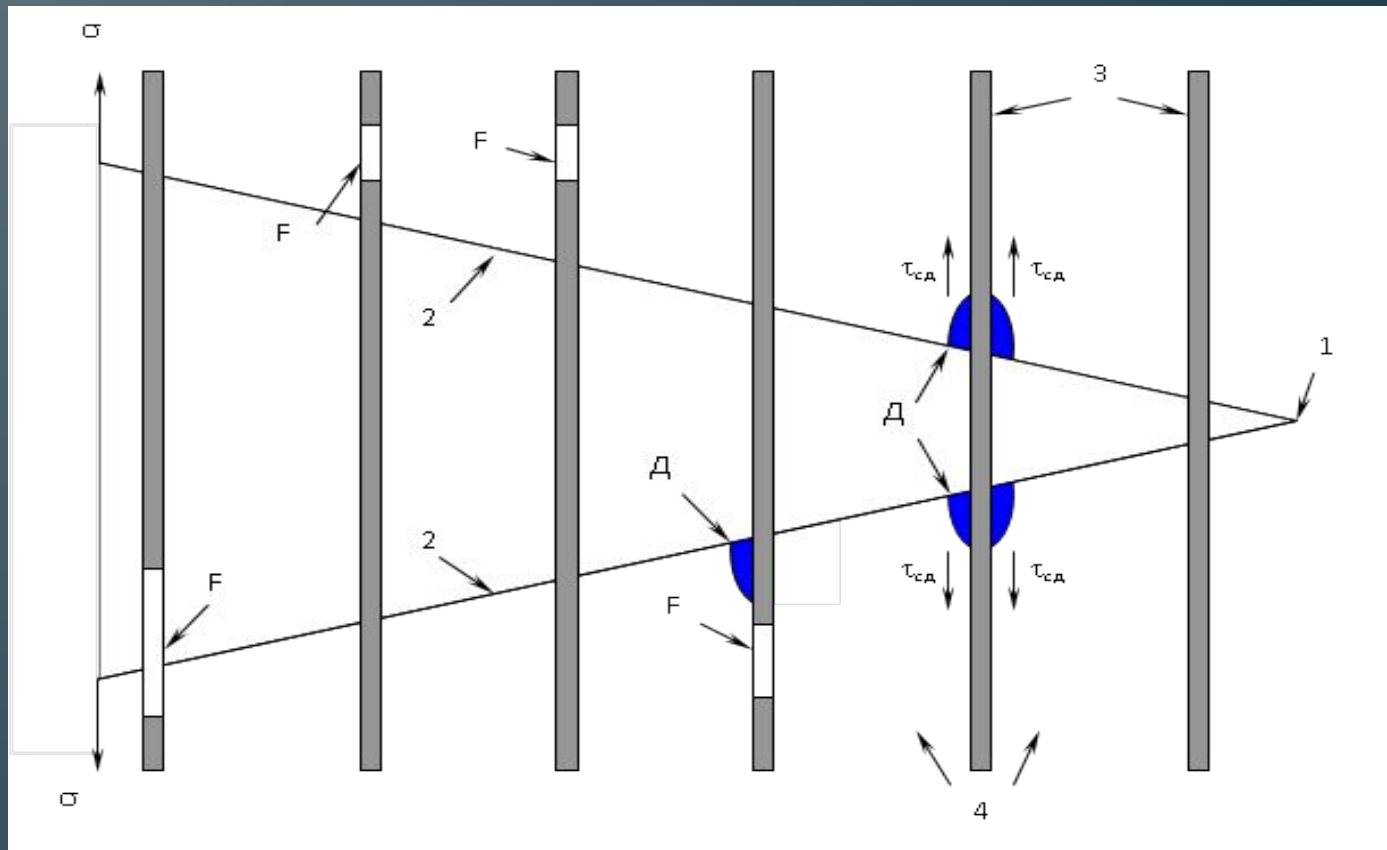


- Дисперсные частицы наполнителя, равномерно распределенные в объеме матрицы, могут быть представлены фазой ZrO_2 , которая является метастабильной для данных условий.
- При любом внешнем возмущающем воздействии, например, вследствие приложения нагрузки, вибрации или термоудара, в области концентрации напряжений (4) при вершине (5) зарождающейся трещины (эта область носит название – «зона возмущения» или «process zone», ее размер $l = 10-50$ мкм), для группы частиц ZrO_2 (3) наблюдается трансформация метастабильной тетрагональной фазы в стабильную моноклинную фазу, то есть имеет место переход с положительным дилатационным эффектом. Он приводит к возникновению поля сжимающих напряжений у вершины трещины, действующих поперек ее фронта. Это основной механизм повышения сопротивления иницированию и развитию разрушения. Кроме того, микротрещины, которые могут образоваться при этом в матрице у частиц ZrO_2 , также тормозят распространение

Физические основы торможения разрушения в волокнистых композиционных материалах

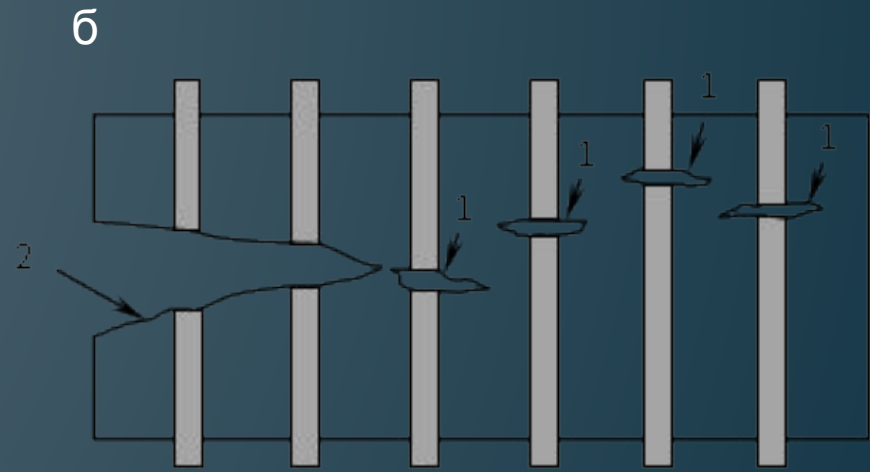
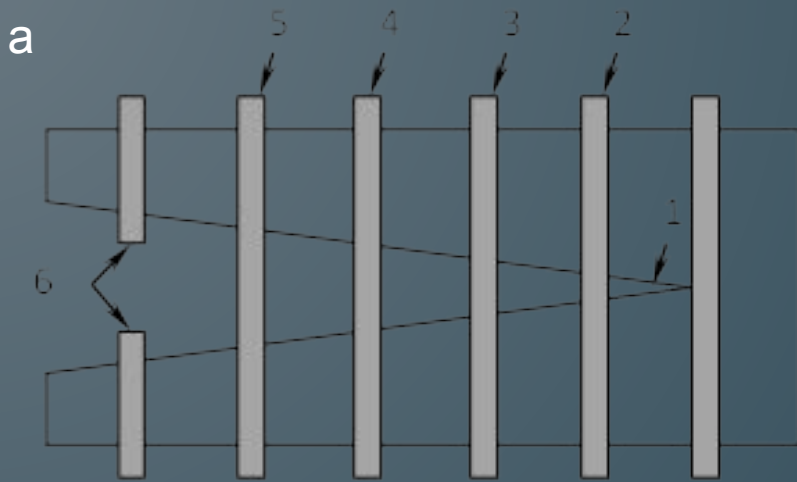
- *Торможение разрушения в ВКМ достигается посредством двух основных механизмов, обеспечивающих повышенное сопротивление развитию трещины:*
- *1) разрушение границ раздела за счет расслоения*
- *2) вытягивание волокон из матрицы.*
- Оба механизма способствуют диссипации (рассеянию) энергии движущейся трещины $W_{тр}$. Трещина движется, поскольку к ее берегам (2) приложено растягивающее напряжение .
- В первом случае $W_{тр}$ затрачивается на разрыв связей (под действием сдвиговых напряжений) между волокном (3) и матрицей (4).
- Во втором случае она затрачивается на преодоление сил трения по поверхности раздела «волокно – матрица». Обычно эти два механизма действуют последовательно.

Распространение трещины в волокнистом композиционном материале



1 – вершина трещины, 2 – берега трещины, 3 – волокна, 4 – матрица, Д – область расслоения ($\sigma_{сд}$ – сдвиговые напряжения), F – область вытягивания волокон.

- Сначала вблизи вершины трещины (1), где действуют максимальные напряжения, разрушаются, в основном, границы раздела и появляются малые сдвиги волокон относительно матрицы (область Д). Затем наблюдается вытягивание волокон (область F), которые на начальной стадии процесса вытягивания перекрывают берега трещины, образуя своеобразные «мостики связи» между ними. По мере раскрытия трещины происходит разрушение таких мостиков. Первоначально инициирование разрушения в объеме волокон происходит по местам их внутренних дефектов – концентраторов напряжений, чаще всего находящихся на некотором удалении от раскрывающихся берегов - вглубь матрицы.

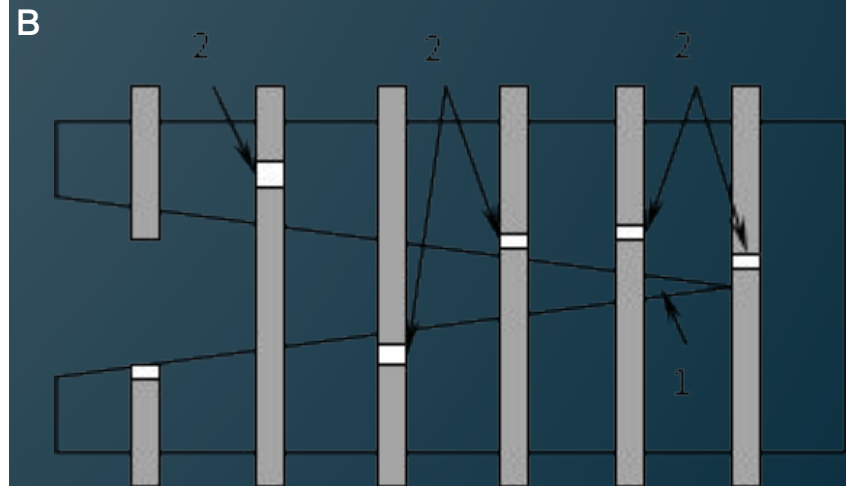


а – волокна – совершенные по структуре,
 1 – трещина, 2-5 – волокна с различной степенью удлинения, 6 – разорванное волокно.

б, волокна содержат заметные внутренние дефекты,
 1 – разрывы в волокнах – локальные очаги разрушения, 2 – трещина.

в – волокна содержат внутренние дефекты,

1 – трещина, 2 – разрушение волокон по локальным областям



- **Типы разрушения в зависимости от различия предельных величин деформации до разрушения матрицы и волокон, от прочности границы раздела «волокно-матрица» и степени совершенства структуры волокон.**

1. Для композита, армированного совершенными по структуре волокнами, не содержащими опасных дефектов, разрушение будет инициироваться в матрице. Далее, при распространении трещины (1), вследствие продольного растяжения, волокна (2-5) удлиняются, их деформация будет достигать некоторой предельной величины, соответствующей разрыву (волокно – 6).

- В этом случае вытягивания волокон из матрицы не происходит из-за высокой прочности границы раздела. Такой характер разрушения наблюдался в композите нержавеющая сталь (матрица) – алюминий (волокна).

- 2. Волокна в композите содержат достаточное количество дефектов . Инициирование разрушения будет происходить по дефектам в волокнах. При этом, образовавшиеся разрывы (1) – локальные очаги разрушения, будут соединяться в протяженную трещину (подобную трещине – 2) вследствие сдвига матрицы . Вытягивания волокон из матрицы не происходит. Такое разрушение может иметь место в композите алюминий (матрица) – бор (волокно).
- 3. Если используемые волокна содержат дефекты, то траектория распространяющейся трещины (1) близка к прямолинейной , поскольку волокна легко вытягиваются из матрицы, а их разрушение совершается по локальным дефектам (2), удаленным от плоскости распространения трещины. Степень дефектности волокон и распределение дефектов по длине волокна во многом будет определять рельеф поверхности излома материала. Такое разрушение наблюдался для