
II. Результати наукових досліджень

УДК 539.4

А. В. Боровик, В. Г. Боровик

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛАВНОГО ПРИЗНАКА КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ПОМОЩЬЮ КОГЕЗИОННОЙ МОДЕЛИ ГРАНИЦЫ ВОЛОКНА

Главным признаком конструкционного материала мы считаем наличие у него механизмов неупругого сдвига только в направлении максимальных нормальных напряжений и отсутствие этих механизмов в других направлениях. Модель “треснутое волокно в трубке” использована для изучения влияния когезионной прочности границы волокна на коэффициент интенсивности напряжений для трещины в волокне и энергию, которая поглощается при неупругом сдвиге на границах волокон при их разрушении. Получены значения когезионной прочности границы между волокнами и расстояние между трещинами в волокне, при которых поглощается максимальная энергия при разрушении материала на стадии роста трещин в волокнах. Эта стадия предшествует выдергиванию полностью разрушенных волокон.

Ключевые слова: конструкционный материал, однонаправленная волокнистая структура, границы волокон, коэффициент интенсивности напряжений, энергия разрушения.

Вступление

Конструкционные материалы биологического происхождения имеют замечательные сопротивление разрушению и прочность, несмотря на то, что они состоят из компонентов с крайне низкими физико-механическими свойствами. В то же время существует множество искусственных конструкционных материалов с низкими характеристиками, компоненты которых имеют высокие физико-механические свойства. В последние десятилетия это противоречие всё больше привлекает внимание материаловедов. Исследование закономерностей, лежащих в основе замечательных прочностных характеристик биологических конструкционных материалов считается главной задачей механики материалов и материаловедения конструкционных материалов в 21-м веке [1]. Решение этой задачи позволит создавать искусственные конструкционные материалы такие же эффективные, как и биологические материалы, и изменит представления о конструкционном материале как о веществе в твердом состоянии, которое укоренилось в научно-техническом сообществе.

© Боровик Валерій Григорович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. Францевича НАН України; Боровик Олександра Валеріївна — аспірант Інституту проблем міцності ім. Г. Писаренка НАН України.

Целями данной работы является определение главного признака конструкционного материала, который обеспечивает достижение максимального сопротивления разрушению, и исследование когезионного механизма реализации главного признака. Статья состоит из следующих разделов. В разделе 2 предложен главный признак конструкционного материала, рассмотрены механизмы его реализации и параметры, характеризующие эти механизмы. Модель материала с однонаправленной волокнистой структурой представлена в разделе 3. Влияние когезионной прочности интерфейсов волокон на коэффициент интенсивности напряжений (КИН) для трещин в волокнах и энергию поглощаемую интерфейсом при разрушении волокна рассмотрено в разделе 4. В разделе 5 кратко изложены основные результаты работы.

2. Главный признак конструкционного материала

На различных этапах развития науки о конструкционных материалах сопротивление разрушению и прочность ассоциировали с различными факторами: расположением звёзд на небе или с заклинаниями, которые произносили в процессе получения материала, его химическим и фазовым составами и т.д. Эти факторы, безусловно, влияют на свойства материала, но в какой степени? Какой признак материала обеспечивает максимальное сопротивление разрушению? Ответ на этот вопрос позволит разрабатывать материалы с экстремально высоким сопротивлением разрушению.

Нахождение признака, от которого в наибольшей степени зависит конкретное свойство материала, является не тривиальной задачей. Удачный выбор ключевых признаков объектов позволил, например, Менделееву систематизировать химические элементы, Ньютону — сформулировать основные законы механики и т.д. В конструкционном материаловедении нас интересуют, в первую очередь, ключевые признаки, отвечающие за достижение максимальных сопротивления разрушению и прочности. При этом мы различаем собственно формулировку ключевого признака, механизмы его реализации и параметры этих механизмов, при которых достигаются максимальные характеристики конструкционного материала.

Для поиска и анализа ключевого признака, обеспечивающего максимальное сопротивление разрушению, наибольший интерес представляют биологические конструкционные материалы, т.к. они являются наилучшими для условий окружающей среды, в которых существуют организмы. Отметим, что поиск ключевого признака подобен добыче полезного ископаемого, которую целесообразно выполнять в месте его наивысшей концентрации, называемом месторождением. Биологические конструкционные материалы, в некотором смысле, схожи с таким месторождением, в котором сконцентрирован опыт миллиардов лет эволюции.

При анализе биологических конструкционных материалов обращает на себя внимание их однонаправленная слоистая или волокнистая структура с достаточно низким сопротивлением расщеплению и сдвигу вдоль границ несущих элементов структуры. На основании этого наблюдения мы считаем главным признаком наилучшего конструкционного материала наличие в нем механизмов неупругого сдвига только в одном направлении, а именно в направлении максимальных нормальных напряжений, и отсутствие механизмов сдвига в других направлениях.

Легко видеть, что структура материала и низкое сопротивление границ сдвигу являются логическими следствиями главного признака. Размеры сечений несущих элементов структуры определяют масштабный диапазон, в кото-

ром достигаются наилучшие прочностные характеристики материала. Высокое объёмное содержание несущих элементов в материале обеспечивает присутствие механизма сдвига вблизи типичных дефектов. При бесконечно малых размерах сечений несущих элементов и 100%-м заполнением ими объёма мы получаем однородный неструктурированный материал (сплошную среду), критерием текучести является сформулированный выше признак.

2.1. Механизмы реализации главного признака

На низшем иерархическом уровне взаимный сдвиг белковых молекул происходит за счет деформирования и разрыва слабых боковых связей и образования их на новом месте. Прочность боковых связей существенно ниже прочности связей, удерживающих целостность молекул. На высших иерархических уровнях биологических конструкционных материалов механизмом неупругого сдвига служит мягкая прослойка между несущими элементами структуры (волокнами и слоями). Важно отметить, что диаграмма растяжения пучка белковых молекул и материала мягкой прослойки имеет протяженный участок почти идеальной пластичности. Его формирование исследовано в работе [2]. Существуют и другие механизмы неупругого сдвига с подобной диаграммой, например, механизм кулоновского трения.

2.2. Параметры механизмов реализации главного признака

Напряжение τ неупругого смещения вдоль границ несущих элементов является универсальным параметром механизмов сдвига. Это напряжение может представлять когезионную прочность границы на сдвиг, предел текучести мягкой интерфейсной прослойки и др. Напряжение τ связано с прочностью σ несущего элемента структуры соотношением $2 \cdot l \cdot \tau = h \cdot \sigma$, где l — длина участка границы, на котором происходит преобразование касательных напряжений на границе несущего элемента в примерно равномерные нормальные напряжения в его сечении высотой h . Фактически это соотношение представляет собой упрощенную форму уравнения равновесия пластинки, которая растягивается постоянными касательными напряжениями, приложенными к её поверхностям. Для несущего элемента в виде волокна с круглым сечением это уравнение имеет вид $2 \cdot l \cdot \tau = R \cdot \sigma$, где R — радиус волокна. Величину $2l/h$ (или $2l/R$) называют *aspect ratio*. На различных иерархических уровнях несущие элементы биологических конструкционных материалов имеют *aspect ratio* равное примерно 20...40 [см. напр. 3–5] и соответствующее отношение σ/τ . Причина выбора именно такого значения *aspect ratio* в процессе эволюции пока не выяснена.

В механике разрушения слоистых и волокнистых композиционных материалов отношение σ/τ считают критерием преобразования трещины нормального отрыва в трещину сдвига при достижении ею границы несущего элемента и матрицы. В работе [6] впервые предложена модель расщепления границы под влиянием пересекающей её трещины и сделана оценка оптимальной когезионной прочности границы: $\sigma/5 < \tau < \sigma/3$. Достижение этого оптимума авторы связывали с началом распространения трещины сдвига на границе под влиянием поля напряжений магистральной трещины нормального отрыва. Аналогичное отношение критических коэффициентов интенсивности напряжений для трещины нормального отрыва в несущем элементе структуры и КИН сдвига на его границе: $\Gamma_I/\Gamma_{II} \approx 4$ — получено в работах [7–8] как условие распро-

странения трещины на границе из вершины главной трещины. В работе [9] исследовано условие отклонения трещины в границу с помощью когезионной модели, обобщены известные результаты и показаны диапазоны преимущественного влияния прочности и вязкости разрушения элементов структуры материала на отклонение трещины. Значения σ/τ и Γ_I/Γ_{II} (K_{Ic}/K_{IIc}), при которых происходит расщепление границы или отклонение трещины, существенно отличаются от *aspect ratio* несущих элементов структуры биологических конструкционных материалов. Этот факт не позволяет считать отклонение трещины в границу критерием эволюционного совершенствования биологических конструкционных материалов.

Таким образом, закономерности, лежащие в основе взаимосвязи напряжения τ неупругого сдвига границы и *aspect ratio* несущих элементов биологических конструкционных материалов, требуют дальнейшего изучения. Понимание этих закономерностей поможет в разработке новой генерации искусственных конструкционных материалов, так называемых, *bio-inspired* конструкционных материалов.

3. Микромеханическая модель материала с однонаправленной волокнистой структурой

Материалы, подобные разработанным в работах [10–12] соответствуют сформулированному выше главному признаку наилучшего конструкционного материала, имеют максимальное объемное содержание волокон в структуре (рис. 1) и, благодаря этому, обладают наивысшим потенциалом прочностных свойств. При достаточно низкой когезионной прочности границ несущих элементов структуры разрушение материалов [10–12] происходит без образования магистральной трещины, так как трещины в волокнах расположены хаотично по всему объёму материала и их поверхности разрушения не образуют единой плоскости.

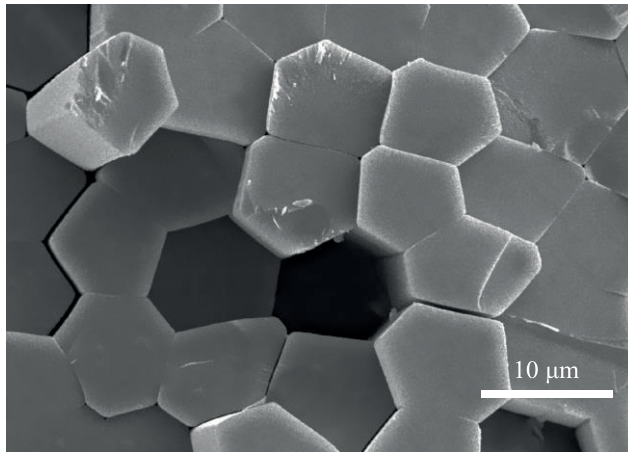


Рис. 1. Излом образца базальтового материала с однонаправленной волокнистой структурой

Элементарную ячейку материала при таком характере разрушения можно представить в виде треснутого волокна, которое расположено внутри трубки, имитирующей окружающие неповрежденные волокна (рис. 2, а). Как мы отметили ранее, у биологических конструкционных материалов когезионная прочность границ существенно ниже прочности несущих элементов структуры при растяжении, а длина участка границы, на котором происхо-

дит неупругий сдвиг, существенно превышает толщину несущего элемента. Поэтому, на основании принципа Сен-Венана мы считаем, что тип трещины в волокне при его разрушении не влияет существенно на длину этого участка. Это позволяет выбрать кольцевую поверхностную трещину в волокне и рассматривать далее осесимметричную модель элементарной ячейки материала. Выбор кольцевой трещины обусловлен тем, что КИН для неё выше, чем для внутренней дискообразной трещины при одинаковых характерных размерах этих трещин.

На внутренней поверхности трубки элементарной ячейки расположена короткая кольцеобразная трещина нормального отрыва. Она введена в модель для изучения влияния концентрации напряжений, возникающей в соседних волокнах в окрестности устья главной трещины в центральном волокне. Очевидно, что эта концентрация напряжений зависит от напряжения неупругого сдвига границы.

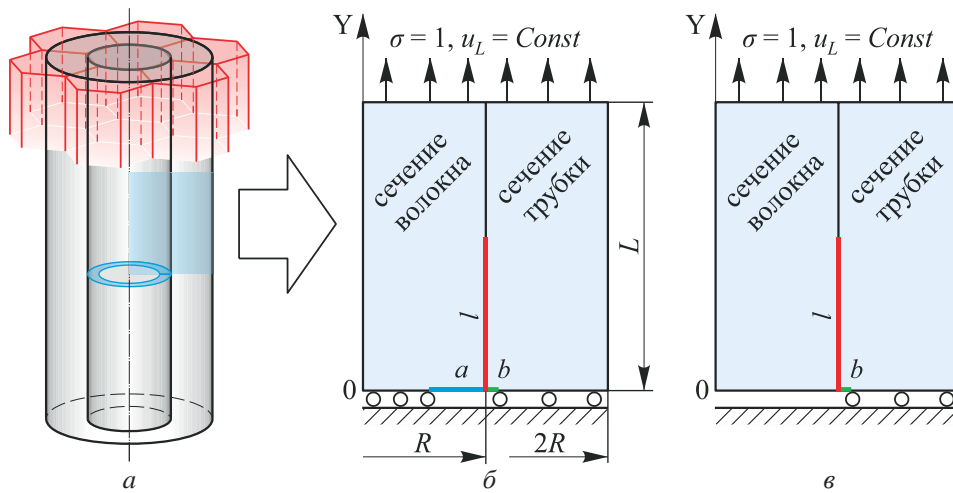


Рис. 2. Модель волокна с кольцевой трещиной в окружении практически неповрежденных волокон, которые представляет трубка (а), фрагмент диаметального сечения модели и граничные условия задачи для трещины $a = 0,1 \dots 0,9$ (б), фрагмент диаметального сечения модели и граничные условия задачи для полностью разрушенного волокна (в)

На рис. 2 представлено диаметральное сечение модели и граничные условия задачи. Здесь $R = 1$ — радиус волокна. Все линейные размеры задачи нормированы по R . Размер кольцевой трещины a изменяли от 0,1 до 0,9 с шагом 0,1. Размер этой трещины отсчитывается от боковой поверхности волокна. На внутренней поверхности трубки расположена короткая кольцевая трещина $b = 0,0025 \cdot R$. Она моделирует короткие трещины в соседних волокнах. Вследствие ее малого размера, она практически не влияет на податливость трубки. Напряжение когезионной прочности границы волокна изменяли от 0,001 до 1,0 с шагом $lg(\tau_c) = 0,5$. Длина части границы волокна, на которой происходит неупругий сдвиг обозначена через l . Длина модели обозначена через L . Её выбирали для каждого значения τ_c , чтобы удовлетворить условию $L > l$ при $a = 0,9$.

Нагружение модели осуществляли приложением к её верхнему торцу перемещения, которое приводит к среднему единичному растягивающему

напряжению. Напряжения неупругого сдвига границы волокна τ_c нормированы по напряжению, которое приложено к верхнему торцу модели.

Дополнительно было рассмотрено влияние напряжения неупругого сдвига границы с использованием модели, в которой волокно полностью разрушено (рис. 2, *c*), то есть на нижнем торце волокна (при $Y = 0$) отсутствовали кинематические ограничения и напряжения σ_y . При этом волокно втягивается в трубку в процессе нагружения модели.

Кроме того, определены КИН для внутренней кольцевой трещины в круговом прутке радиусом 2 и длиной $L = 20$. Наружный радиус кольцевой трещины был равен 1,0025, а внутренний радиус изменяли от 0,1 до 1,0 с шагом 0,1. Эта модель представляет материал как сплошную среду, в которой отсутствуют волокна и их границы.

Для дискретизации модели использованы конечные элементы типа PLANE183 (по классификации ANSYS). Окрестности трещин *a* и *b* имели идентичные сетки конечных элементов.

Модуль Юнга и коэффициент Пуассона волокна и трубки равны 10000 и 0,3 соответственно. Нормальная и тангенциальная жесткости контактных элементов на границе волокна равны 10000. Предельное взаимное смещение границы волокна и трубки, при котором происходит полное разделение волокна составляет 10000. Такое большое значение выбрано для того, чтобы приблизить когезионную модель границы (CZM [13]) модели идеальной пластичности или Кулоновского трения. Отметим, что максимальное взаимное смещение точек границы достигается в устье трещины в волокне.

4. Результаты и обсуждение

4.1. Коэффициенты интенсивности напряжений для трещины в центральном волокне модели

На рис. 3 представлены КИН для кольцевой поверхностной трещины в волокне K_{Ia} и для короткой кольцевой трещины на внутренней поверхности трубы K_{Ib} при различных напряжениях неупругого сдвига границы, а также для внутренней кольцевой трещины в сплошном прутке, радиус сечения которого равен наружному радиусу трубки. Кроме того, на левом рисунке представлены КИН для кольцевой поверхностной трещины в круглом стержне при растяжении (без трубки). Боковая поверхность стержня свободна от внешних нагрузок и кинематических ограничений. Отличие КИН для кольцевой поверхностной трещины в стержне, полученные в данной работе, и КИН, представленных в справочнике [14], составляет не более чем 0,2%.

При этом из рис. 3 видно, что K_{Ia} возрастает с ростом трещины в волокне. При этом, интенсивность этого возрастания заметно снижается с ростом напряжения неупругого сдвига границы между волокном и трубкой (соседними волокнами). Увеличение K_{Ib} для короткой поверхностной трещины в трубке с ростом трещины в волокне становится заметным при $\tau_c > 0,1$. Это показывает, что при $\tau_c < 0,1$ рост трещины в волокне не приводит к существенному увеличению КИН для коротких трещин в соседних волокнах, т.е. при выполнении данного условия разрушение одного волокна практически не вызывает концентрации напряжений в соседних волокнах и не стимулирует их разрушение.

II. Результати наукових досліджень

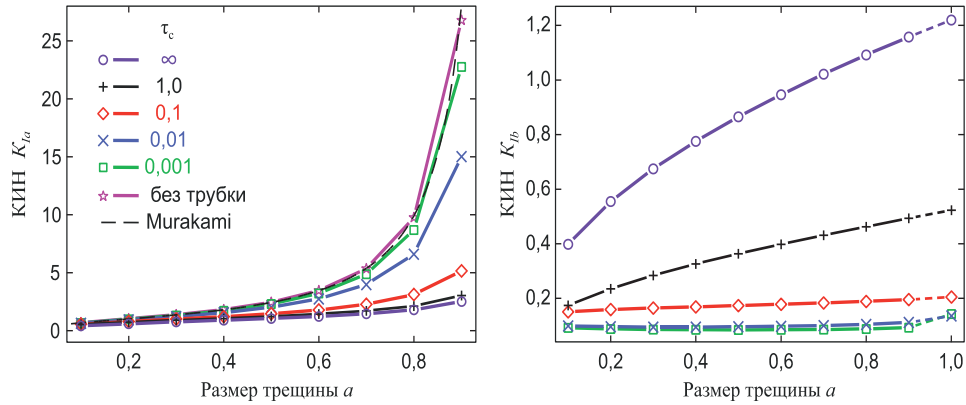


Рис. 3. Коэффициент интенсивности напряжений (КИН) K_{Ia} для кольцевой поверхностной трещины в волокне (слева) и КИН K_{Ib} для короткой кольцевой трещины глубиной 0,0025 на внутренней поверхности трубы (справа). Результаты для $\tau_c \rightarrow \infty$ представляют КИН для внутренней кольцевой трещины в сплошном прутке с радиусом сечения равным 2. Внешний радиус этой трещины равен 1,0025. Значения K_{Ib} при размере трещины a равном 1,0 на правом рисунке соответствуют полностью разрушенному волокну

На рис. 4 представлены относительные КИН K_{Ia}/K_{I0} для кольцевой поверхностной трещины в волокне в зависимости от размера трещины и величины напряжения неупругого сдвига интерфейса между волокнами.

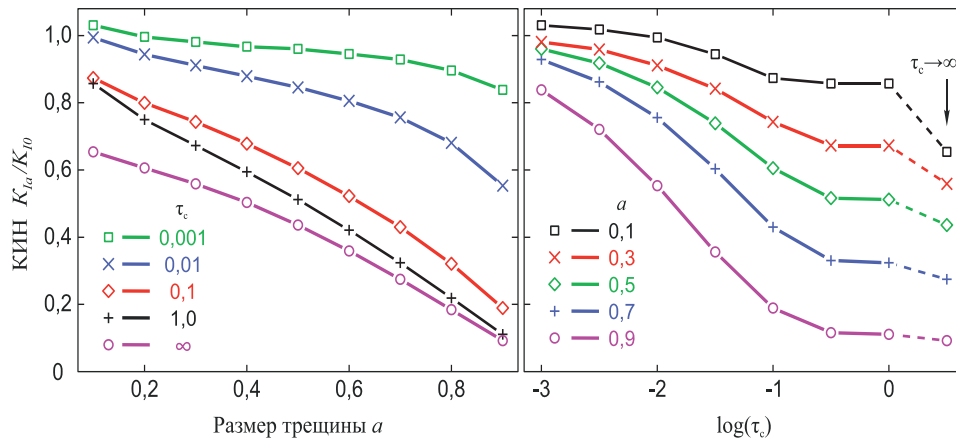


Рис. 4. Изменение КИН для кольцевой поверхностной трещины в волокне, которое нагружено параллельно с окружающими волокнами по отношению к КИН для такой же трещины в одиночном волокне со свободной от внешних нагрузок и кинематических ограничений боковой поверхностью. Взаимосвязь между центральным и окружающими волокнами характеризуется напряжением неупругого сдвига τ_c интерфейса между ними. Нижняя кривая на левом рисунке и крайние правые значения на правом рисунке соответствуют внутренней вершине трещины для внутренней кольцевой трещины в сплошном прутке

Нормирование выполнено по КИН K_{I0} для кольцевой поверхностной трещины в одиночном волокне (круглом прутке), боковая поверхность которого свободна от внешних нагрузок и кинематических ограничений.

Из рис. 4 видно, что относительный КИН снижается с ростом трещины в волокне, которое нагружено параллельно с окружающими волокнами. Это

снижение происходит также при повышении напряжения неупругого сдвига границы между волокнами. Таким образом, требуется прикладывать повышенную нагрузку для старта трещины в волокне или её роста с некоторой конкретной скоростью при увеличении напряжения неупругого сдвига границы между волокнами. Очевидно, что последнее эквивалентно увеличению прочности материала.

Снижение КИН в волокне с трещиной происходит из-за увеличения его податливости и вызванного этим уменьшения части нагрузки, которую несет это волокно в пучке параллельно нагруженных волокон. Перераспределение нагрузок между треснутым волокном и окружающими волокнами зависит от когезионной прочности границ волокон. Увеличение когезионной прочности приводит к снижению отношения нагрузки, которую несет треснутое волокно, к нагрузке, которую несут окружающие волокна. Соответственно снижается КИН для трещины в волокне.

Для некоторых конфигураций тел с трещинами, несущими нагрузку параллельно с упругими элементами, наблюдают не только относительное снижение КИН по сравнению с КИН в отсутствие параллельных упругих элементов, но и снижение самого КИН с ростом трещины, которое обуславливает её торможение и остановку. Этот эффект используют при исследовании разрушения хрупких материалов [15–18].

4.2. Коэффициенты интенсивности напряжений для коротких трещин в соседних волокнах

На рис. 5 представлено отношение КИН K_{Ib} для трещины на внутренней поверхности трубы к КИН K_{Ia} для кольцевой поверхностной трещины в волокне. Отличие трещин a и b состоит в том, что вблизи вершины трещины b расположена граница волокна и трубки, которая является поверхностью неупругого сдвига и ориентирована перпендикулярно плоскости трещин (параллельно направлению внешних растягивающих напряжений). Как видно, эта граница существенно снижает КИН в вершине трещины даже при высокой когезионной прочности. Таким образом, в волокнистой (слоистой) структуре низкий КИН характерен не только для трещины, вершина которой находится внутри эластичной прослойки между несущими элементами (слоями [19]), но и для короткой поверхностной трещины в самом несущем элементе. Другими словами, по мере снижения когезионной прочности границы, пересекающей трещину вблизи её вершины, трещина виртуально освобождается от части своей длины и становится короткой поверхностной трещиной.

В данной работе мы рассмотрели наиболее критичный случай расположения трещины b — в одной плоскости с главной трещиной a . Смещение плоскостей трещин a и b приведет к еще большему снижению K_{Ib} .

Из рис. 4 и 5 видно, с уменьшением размера трещины возрастает различие между результатами, которые соответствуют напряжению неупругого сдвига границы $\tau_c > 0,1$ и наиболее жесткой границе (её отсутствию), т.е. $\tau_c \rightarrow \infty$. По-видимому, это обусловлено повышением относительной погрешности вычисления реакции в контакте поверхностей границы при их малых относительных перемещениях, имеющих место как при малых размерах трещины, так и при высоких значениях когезионной прочности.

II. Результаты научных исследований

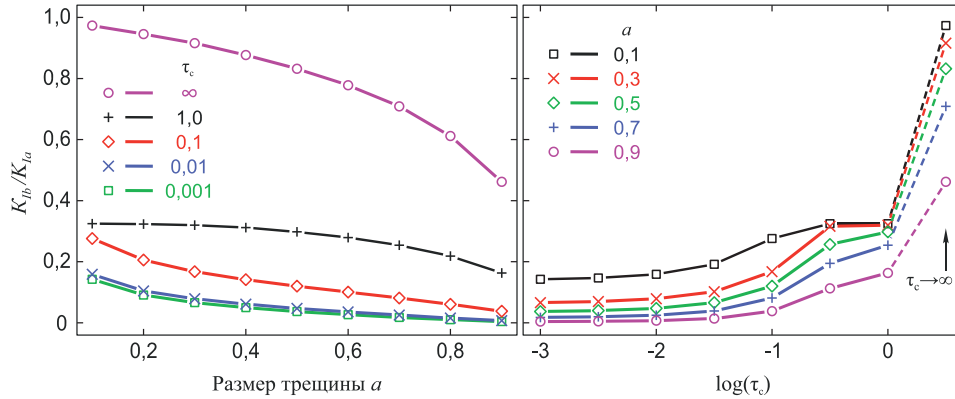


Рис. 5. Изменение отношения КИН в вершине короткой поверхностной трещины в трубе к КИН в вершине кольцевой трещины в волокне с ростом размера кольцевой поверхностной трещины в волокне при различной когезионной прочности границы между волокнами (слева) и изменение этого отношения с ростом когезионной прочности границы для кольцевых поверхностных трещин различных размеров (справа). Верхняя кривая на левом рисунке и крайние правые значения на правом рисунке соответствуют внутренней вершине трещины для внутренней кольцевой трещины в сплошном прутке

4.3. Поглощение энергии на границе волокна при его разрушении

На рис. 6 слева представлено изменение энергии, которая поглощается на границе волокна с трещиной $a = 0,9$. Нормирующей величиной выбрана энергия, которая поглощается на границе этого волокна при $\tau_c = 0,01$.

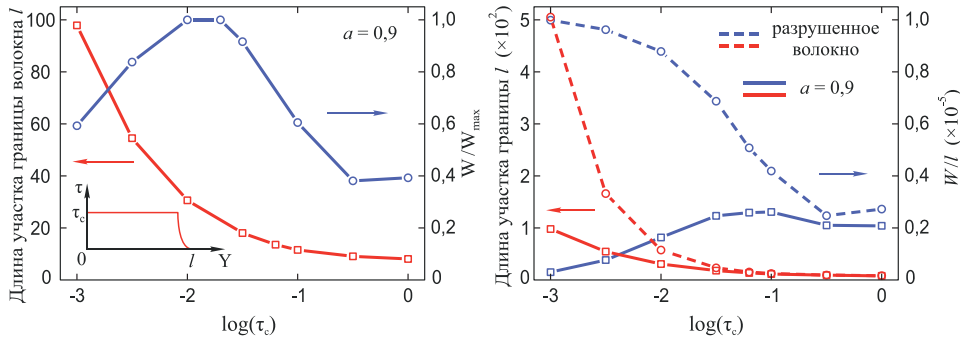


Рис. 6. Изменение энергии, поглощаемой при неупругом сдвиге на границе волокна с трещиной $a = 0,9$ и длина участка неупругого сдвига на границе этого волокна (слева). Энергия, поглощаемая единицей длины границы разрушенного и неразрушенного волокон при различной когезионной прочности границы, и длина участка неупругого сдвига на границе волокна (справа). Нормирование на левом рисунке выполнено по энергии W_{max} , поглощаемой на границе при $\tau_c = 0,01$

На левом рисунке представлена также длина l участка неупругого сдвига на границе волокна с трещиной $a = 0,9$ при различной когезионной прочности границы. Длину l определяли, как расстояние от трещины a до точки на границе, в которой напряжения сдвига вдоль границы становится меньше 0,01% от τ_c .

Если энергию, поглощаемую при неупругом сдвиге на границе, прилегающей к трещине, отнести к длине участка границы, на котором это

поглощение происходит, то мы получаем зависимости, представленные на рис. 6 справа, для волокна с большой трещиной ($a = 0,9$) и разрушенного волокна. Как видно, при растяжении напряжением σ пучка, содержащего неразрушенное (треснутое) волокно, максимальная энергия поглощается при когезионной прочности границ $\tau = \tau_c \cdot \sigma \approx (0,07 \dots 0,1) \cdot \sigma$. Если при напряжении σ достигается вязкость разрушения материала волокна (K_{Ic}) для трещины a , то когезионную прочность можно масштабировать с помощью выражения $\tau = \tau_c \cdot K_{Ic} / K_{Ia}$. Здесь K_{Ia} – КИН для трещины $a = 0,9$ в волокне при напряжении $\sigma = 1$ и $\tau_c = 0,07 \dots 0,1$. Значения $K_{Ia} = 6,7 \dots 5,1$ представлены на рис. 2, слева. После подстановки получили численное значение когезионной прочности границ в материале с однонаправленной волокнистой структурой: $\tau \approx (0,01 \dots 0,02) \cdot K_{Ic}$. На конечной стадии разрушения волокна при этой когезионной прочности границы длина участка неупругого сдвига составляет $l \approx 12 \dots 14$. Таким образом, материал с неразрушенными волокнами будет поглощать максимальную энергию при деформировании, если волокна содержат трещины на расстоянии $24 \dots 28$ радиусов волокна друг от друга и имеют данную когезионную прочность границ. В этом случае, поглощенная энергия, приходящаяся на одну трещину, меньше, чем при $\tau_c \approx 0,01 \dots 0,02$ (рис. 6, слева), но энергия, поглощаемая границей волокна будет в 1,6 раза выше за счет большего, примерно вдвое, количества трещин в волокне.

Расстояние между трещинами в волокне ($24 \dots 28$ радиусов), которое обеспечивает поглощение максимальной энергии на начальной стадии разрушения очень хорошо коррелирует с *aspect ratio* несущих элементов структуры биологических конструкционных материалов. Возможно, критерием для эволюционного совершенствования этих материалов и, в частности, для выбора оптимальной когезионной прочности границ несущих элементов структуры является поглощение максимальной энергии на начальной стадии разрушения. Кроме того, при $\tau_c \approx 0,07 \dots 0,1$ достигается близкое к максимальному снижение КИН для поверхностной трещины в волокне, что обеспечивает почти максимальную прочность материала. При изучении деформирования и разрушения пучка коллагеновых молекул методом молекулярного динамического моделирования в работе [20] также установлено, что максимальные прочность пучка и поглощение энергии при разрушении достигаются при близких значениях напряжений неупругого сдвига между молекулами. При моделировании разрушения материала паутины [21] показано, что прочность и энергия, поглощаемая при разрушении изменяются подобным образом при изменении содержания пластичной компоненты материала. Это свидетельствует о том, что противоречие между прочностью и вязкостью разрушения в биологических конструкционных материалах практически отсутствует.

Отметим, появление максимума на зависимости $W - \tau_c$ или $W/l - \tau_c$ в диапазоне $0,01 > \tau_c > 0,1$ обусловлено наличием трещины в волокне. Очевидно, что трещину в волокне можно заменить эластичной прослойкой с такой же податливостью и получить примерно такие же зависимости $W - \tau_c$ или $W/l - \tau_c$.

После разрушения волокна начинается процесс его выдергивания из пучка окружающих волокон. Для изучения этой стадии разрушения наша модель трансформируется в обычную модель распределенного сдвига “пруток в трубке”, которую обычно используют для изучения влияния выдергивания разрушенного волокна на рост трещины в матрице композици-

онного материала (см. например [22]). На этой стадии разрушения поглощение энергии на единицу длины волокна растет вместе со снижением когезионной прочности интерфейса, по крайней мере, до $\tau_c \approx 0,001$. Заметное снижение темпа нарастания плотности поглощаемой энергии со снижением когезионной прочности границы, по-видимому, также приведет к появлению максимума на зависимости $W/l - \tau_c$ в интервале более низких значений τ_c . Длина участка преобразования сдвиговых напряжений на границе волокна в нормальные напряжения в его сечении, равная 500 радиусов волокна (рис. 6, справа), намного превышает известные значения *aspect ratio* несущих элементов структуры биологических конструкционных материалов. Поэтому в данной работе мы не определяли положение максимума на зависимости $W/l - \tau_c$ для случая разрушенного волокна.

5. Заключение

В работе сформулирован главный признак конструкционного материала биологического происхождения: наличие в нем механизмов неупругого сдвига в одном направлении, а, именно, только в направлении максимальных нормальных напряжений, и отсутствие механизмов сдвига в других направлениях. Однонаправленные слоистая и волокнистая структуры материала на различных иерархических уровнях являются следствиями этого признака.

Модель “треснутое волокно в трубке” использована для исследования влияние когезионной прочности границы между волокнами на КИН для кольцевой поверхностной трещины в волокне, на КИН для коротких трещин в соседних волокнах и поглощение энергии на границе волокна с трещиной при его совместном деформировании с соседними волокнами.

Установлено, увеличение когезионной прочности границ между волокнами приводит к снижению КИН для трещины в волокне, что эквивалентно повышению прочности материала. В материале с однонаправленной структурой волокно может поглотить максимальную энергию при разрушении, если оно содержит трещины на расстоянии 24...28 радиусов волокна друг от друга, а напряжение неупругого сдвига на границе волокна численно равно $(0,01 \dots 0,02) \cdot K_{Ic}$, где K_{Ic} — вязкость разрушения материала волокна.

Обнаруженные закономерности, по-видимому, лежат в основе совершенствования биологических конструкционных материалов в процессе эволюции. Они могут быть использованы при разработке новой генерации *bio-inspired* конструкционных материалов, структура которых практически на 100% состоит из несущих элементов и поэтому обладающих наивысшим потенциалом механических свойств.

Головною ознакою конструкційного матеріалу ми вважаємо наявність у ньому механізмів непружного зсуву тільки в напрямку максимального нормального напруження і відсутність цих механізмів в інших напрямках. Модель «тріснуте волокно в трубці» використана для вивчення впливу когезійної міцності межі волокна на коефіцієнт інтенсивності напружень для тріщини у волокні і енергії, яка поглинається при непружному зсуві на межах волокон при їх руйнуванні. Отримані значення когезійної міцності між

волокнами, при яких поглинається максимальна енергія при руйнуванні матеріалу на стадії росту тріщин у волокнах. Ця стадія передує висмикнуванню повністю зруйнованих волокон.

Ключові слова: конструкційний матеріал, односпрямована волокниста структура, межі волокон, коефіцієнт інтенсивності напружень, енергія руйнування.

The main feature of the structural material, we consider the presence in its mechanisms of inelastic shear only in the direction of the maximum normal stress and the absence of these mechanisms in other directions. The "cracked fiber-in-tube" model is used to study the effect the cohesive strength of the fiber interface on the stress intensity factor for a crack in the fiber and energy that is absorbed in the inelastic shear at the interfaces of fibers at their fracture. The value the cohesive strength of the interfaces and the distance between the cracks in the fiber at which the maximum energy is absorbed at the fracture at the stage of cracks growth in the fibers were obtained. This stage precedes pull-out completely broken fibers.

Keywords: structural material, unidirectional fibrous structure, fiber interface, stress intensity factor, fracture energy.

1. Gao H. Application of fracture mechanics concepts to hierarchical biomechanics of bone and bone-like materials // Int. J. Fract. – 2006. – Vol. 138. – P. 101–137.
2. Buehler M. J. Nanomechanics of collagen fibrils under varying cross-link densities: Atomistic and continuum studies // J. Mech. Behav. Biomed. Mater. – 2008. – Vol. 1. – P. 59–67.
3. Landis W. J. Mineral and Organic Matrix Interaction in Normally Calcifying Tendon Visualized in Three Dimensions by High-Voltage Electron Microscopic Tomography and Graphic Image Reconstruction / W. J. Landis, M. J. Song, A. Leith, L. McEwen, B. F. McEwen // J. Struct. Biol. – 1993. – Vol. 110, No. 1. – P. 39–54.
4. Bozec L. Topography and Mechanical Properties of Single Molecules of Type I Collagen Using Atomic Force Microscopy / L. Bozec, M. Horton // Biophys. J. – 2005. – Vol. 88. – P. 4223–4231.
5. Fritsch A. Ductile sliding between mineral crystals followed by rupture of collagen cross-links: Experimentally supported micromechanical explanation of bone strength / A. Fritsch, C. Hellmich, L. Dormieux // J. Theor. Biol. – 2009. – Vol. 260. – P. 230–252.
6. Cook J. A mechanism for the control of crack propagation in all-brittle systems / J. Cook, J. E. Gordon // Proc. Roy. Soc. (London), Ser. A. – 1964. – Vol. 282, No. 1391. – P. 508–520.
7. Thouless M.D. Delamination from surface cracks in composite materials / M. D. Thouless, H. C. Cao, P. A. Mataga // J. Mater. Sci. – 1989. – Vol. 24, No. 4. – P. 1406–1412.
8. He M. Y. Crack deflection at an interface between dissimilar elastic materials / M. Y. He, J. W. Hutchinson // Int. J. Solids Structures. – 1989. – Vol. 25. – P. 1053–1067.
9. Parmigiani J. P. The roles of toughness and cohesive strength on crack deflection at interfaces / J. P. Parmigiani, M. D. Thouless // J. Mech. Phys. Solids. – 2006. – Vol. 54. – P. 266–287.
10. Ishikawa T. Crack-resistant fiber-bonded ceramic. // Adv. Eng. Mater. – 1999. – Vol. 1. – P. 59–61
11. Kovar D. Fibrous monolithic ceramics / D. Kovar, B. H. King, R. W. Trice, J. W. Halloran // J. Amer. Ceram. Soc. – 1997. – Vol. 80. – P. 2471–2487.
12. Боровик В. Г. Новый конструкционный материал с однонаправленной волокнистой структурой / В. Г. Боровик, О. Н. Григорьев, В. Н. Субботин // Порошковая Металлургия – 2012. – Vol. 51, No. 1/2. – С. 65–74.
13. Alfano G. Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues / G. Alfano, M. A. Crisfield // Int. J. for Numerical Methods in Engineering. – 2001. – Vol. 50, No. 7. – P. 1701–1736.
14. Stress Intensity Factors Handbook, Vol. 1, Ed. Y. Murakami et al., Pergamon press, Oxford, 1987. – P. 71.

II. Результати наукових досліджень

15. *Pabst R. F.* Neuere Methoden der Festigkeitsprüfung keramischer Werkstoffe // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik.* – 1975. – Vol. 6, No 1. – P. 17–29.
16. *Боровик В. Г.* Использование упругих элементов при испытаниях образцов с трещинами // *Проблемы Прочности* – 1984. – Vol. 16, No 7. – P. 114–117.
17. *Borovik V. G.* Computer-Aided, Single-Specimen Controlled Bending Test for Fracture-Kinetics Measurement in Ceramics / V. G. Borovik, V. M. Chushko, S. P. Kovalev // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 1995. – Vol. 78, No 5. – P. 1305–1312.
18. *Nojima T.* Development of Crack Stabilizing Apparatus for Fracture Toughness Testing in Brittle Materials / T. Nojima, T. Oka, H. Kobayashi // *J. Ceram. Soc. of Japan.* – 1997. – Vol. 105, No. 8. – P. 690–694.
19. *Hamamoto Y.* Realistic Numerical Analysis of a Bioinspired Layered Composite with a Crack: Robust Scaling Laws and Crack Arrest / Y. Hamamoto, K. Okumura // *Adv. Eng. Mater.* – 2013. – Vol. 15, No. 6. – P. 522–528.
20. *Buehler M. J.* Nature designs tough collagen: Explaining the nanostructure of collagen fibrils // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* – 2006. – Vol. 103, No 33. – P. 12285–12290.
21. *Bosia F.* Hierarchical simulations for the design of supertough nanofibers inspired by spider silk / F. Bosia, M. J. Buehler, N. M. Pugno // *Phys. Review E* – 2010. – Vol. 82, No 5. – P. 1–7.
22. *Liu Y.-F.* Analysis of debonding and frictional sliding in fiber-reinforced brittle matrix composites: basic problems / Y. - F. Liu, Y. Kagawa // *Mater. Sci. Eng. A* – 1996. – Vol. 212, No. 1. – P. 75–86.