

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Им. М. В. Ломоносова

МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

УДК 539.3

Шпенёв Алексей Геннадьевич

**ВЛИЯНИЕ СЛАБОЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА
ВОЛОКНО/МАТРИЦА НА СВОЙСТВА
ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА
ИЗ ХРУПКИХ КОМПОНЕНТОВ**

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2008 г.

Работа выполнена на кафедре теории пластичности механико-математического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель	кандидат физико-математических наук, доцент К.А. Хвостунков
Официальные оппоненты	доктор технических наук, профессор С.Т. Милейко доктор физико-математических наук, профессор Д.В. Георгиевский
Ведущая организация	Институт машиноведения РАН им. А.А. Благонравова

Защита состоится 12 сентября 2008 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.91 при Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова по адресу 119991, ГСП-1, РФ, г.Москва, Ленинские горы, главное здание МГУ, аудитория 16-10.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке механико-математического факультета МГУ (главное здание, 14 этаж).

Автореферат разослан «09» июня 2008 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 501.001.91,
доктор физико-математических наук, профессор

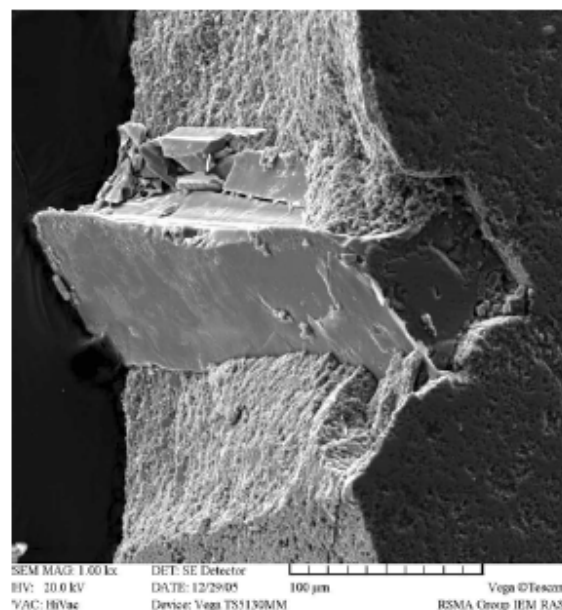
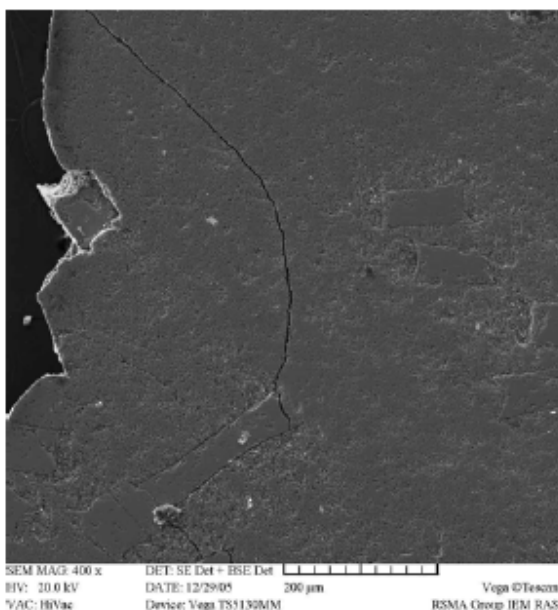


С.В. Шешенин

1. Общая характеристика работы

Актуальность работы. Одними из основных современных конструкционных материалов, эксплуатирующихся в условиях высоких температур порядка 1200-1500 градусов являются композитные материалы из хрупкого волокна и хрупкой матрицы. Серьезным препятствием к их широкому применению является их низкая трещиностойкость (обусловленная отсутствием классической для случая металлов, пластической зоны в кончике трещины).

Проблемы хрупкого разрушения волокнистых композитов рассматривались в работах таких авторов как Г.И.Черпанов, Б.Будянский, А.Кэлли и др. Вопросам поиска сочетаний свойств матрицы, волокна и области контакта волокно-матрица, оптимальных для трещиностойкости материала, посвящён ряд работ начиная с доклада Авестона, Купера и Келли на конференции в Гилфорде в 1971 году и заканчивая современными работами этих и многих других авторов. Существуют два основных направления улучшения эксплуатационных свойств таких материалов. Первое – увеличение энергии разрушения, второе – уменьшение скоростей ползучести при высоких температурах.



Композит сапфир-корунд с пироуглеродной прослойкой между волокном и матрицей

Увеличение энергии разрушения достигается обычно за счёт создания различных покрытий волокна, уменьшающих его сцепление с матрицей. Высокая скорость ползучести при температурах 1200-1500°С может быть преодолена путём создания монокристаллических волокон, не подверженных явлению зернограничной ползучести. Однако таким материалам присуща ещё одна особенность, выявленная в ходе экспериментов.

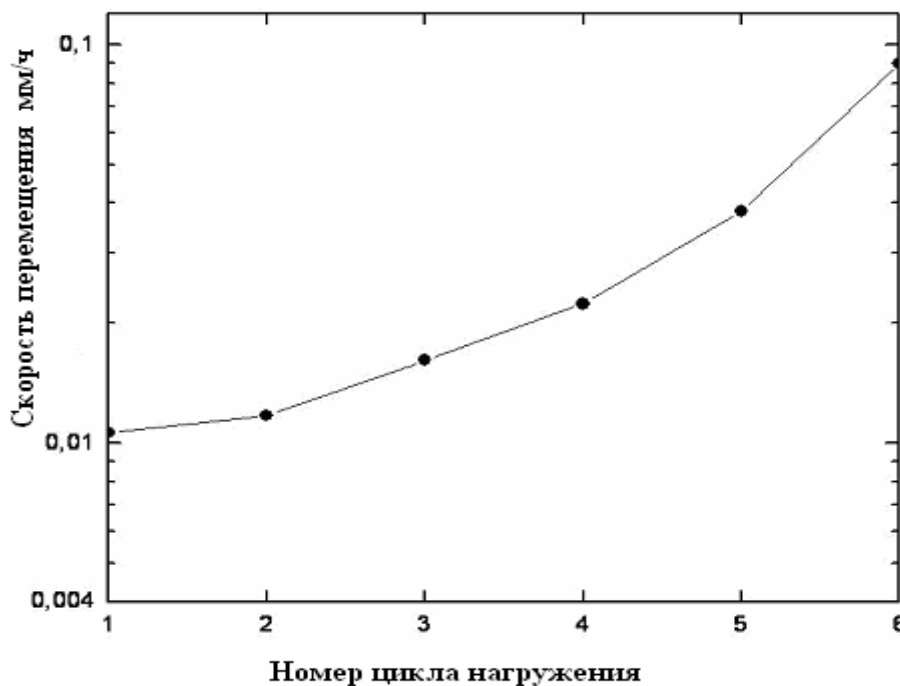
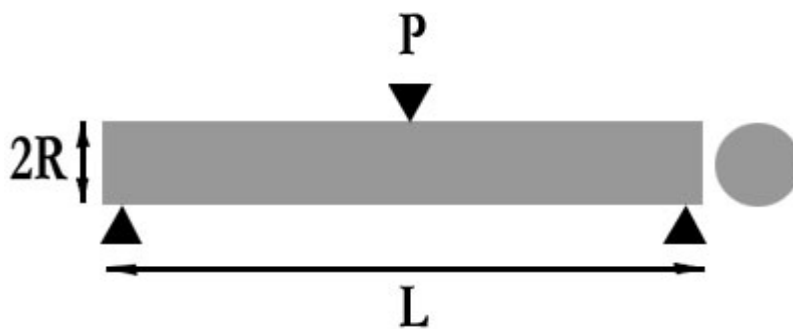


Схема испытаний на циклическую усталость при высокотемпературной ползучести композита с монокристаллическим волокном и поликристаллической матрицей.

Во время испытаний при циклической нагрузке выяснилось, что от цикла к циклу скорость установившейся ползучести возрастает и на 6-10 цикле превосходит скорость на первом цикле на порядок, после чего происходит разрушение образца.

Существует насущная необходимость построения модели связывающей микроструктуру композитного материала с его вышеперечисленными свойствами: энергией разрушения, скоростью установившейся ползучести при высоких температурах и циклической усталостью. На данный момент есть достаточно много моделей влияния свойств границы раздела волокно/матрица на свойства материалов из хрупких компонентов, однако практически все модели имеют циклически обратимый характер и не дают качественного описания малоциклового усталости материала. Практически единственным описанным подходом к этой проблеме является моделирование распространения в поверхности раздела/волокно матрица усталостной трещины, описываемое формулой Париса. Однако данная модель создана изначально для усталостного разрушения других материалов в течение большого количества циклов. В данной работе создана модель, описывающая малоцикловую усталость композитных материалов с хрупким волокном и хрупкой матрицей, за счёт явления износа поверхности контакта между волокном и матрицей.

Цель работы. Целью работы является построение модели волокнистого композитного материала из хрупких компонентов, позволяющей учесть одновременно следующие характеристики материала:

- Циклическую усталость при испытаниях на высокотемпературную ползучесть, соответствующих предполагаемой эксплуатации материалов в двигателях и турбинах
- Скорость высокотемпературной ползучести
- Энергию разрушения материала

Целью работы также является определение оптимальных значений свойств волокна, матрицы и границы их раздела, максимально улучшающих вышеперечисленные характеристики.

Достоверность основных положений и выводов определяется, во-первых, тем, что базируется на анализе экспериментальных данных, полученных в лабораториях ИФТТ г. Черноголовка, во-вторых, анализом соответствия аналитических решений решениям, полученными численно.

Научная новизна работы. В работе создана принципиально новая модель малоциклового усталости композитных материалов, опирающаяся на феномен абразивного износа поверхности контакта волокно/матрица. Модель объединяет в себе подход Келли-Стрита к описанию ползучести материала с упругим волокном и ползущей матрицей, развитый проф. Милейко, и современные модели влияния свойств поверхности раздела волокно/матрица на эксплуатационные свойства материала. Получено определяющее соотношение, описывающее процесс сдвига цилиндрического волокна относительно матрицы. Решены задачи о прогнозе малоциклового усталости материала при высокотемпературной ползучести и об определении энергии затрачиваемой на вытягивание волокон из матрицы при разрушении материала. Получен уровень оптимального разброса свойств волокна в пучке.

Научно-практическое значение работы. Результаты работы используются в настоящий момент при создании композитных материалов нового поколения (с монокристаллическим волокном) в ИФТТ г. Черноголовка.

Апробация работы. Основные результаты, полученные в диссертации докладывались на Ломоносовских чтениях в МГУ (Москва 2007), на 15-ой международной конференции по композитам и наноматериалам ICSE-15 (Китай, г. Хайкоу 2007), на научно-исследовательском семинаре кафедры теории пластичности под руководством проф. Е.В. Ломакина и проф. В.М. Александрова, на научно-исследовательском семинаре кафедры механики композитов МГУ под руководством проф. Б.Е. Победря, на научно-исследовательском семинаре ИМАШ РАН им. Благонравова, на научно-исследовательском семинаре лаборатории армированных систем в ИФТТ РАН г. Черноголовка.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в шести работах.

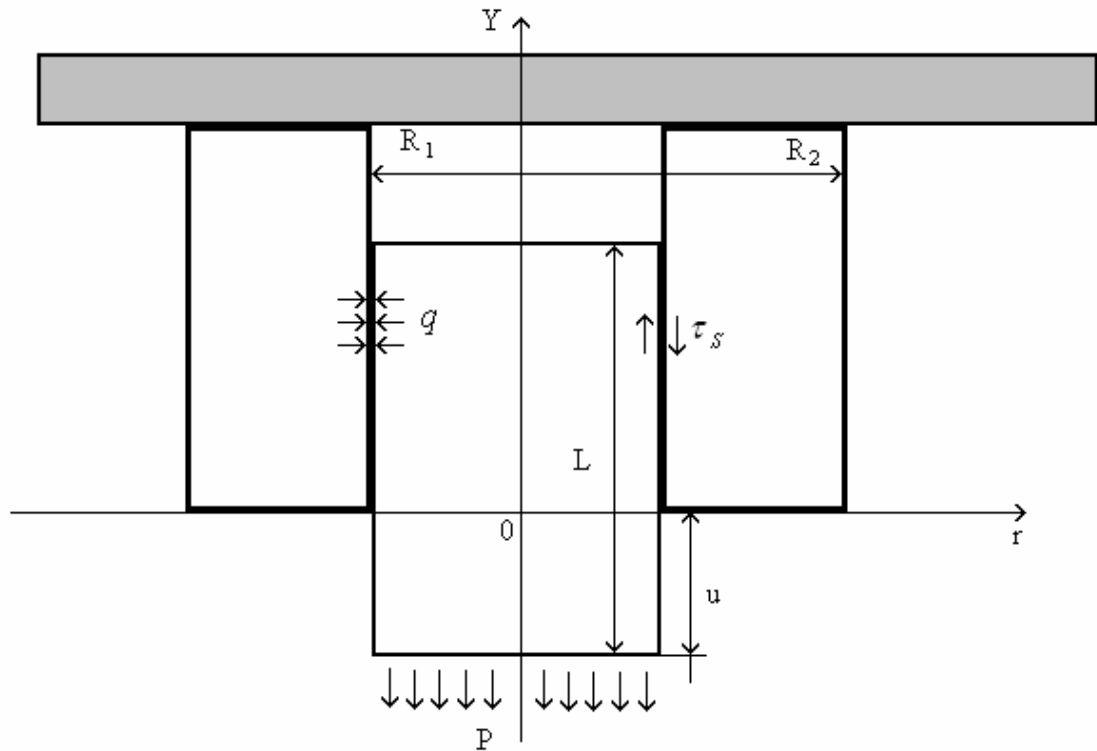
Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы из 103 наименований и трёх приложений. Работа изложена на 92 страницах машинописного текста (из них 18 страниц приложений) и содержит 28 иллюстраций и 4 таблицы.

2. Краткое содержание работы.

Во Введении обосновывается актуальность работы, даётся обзор подходов к описанию структуры и свойств волокнистых материалов из хрупких компонентов, связи их микроструктурных и эксплуатационных свойств, механизмов их разрушения, сформулированы цели исследования.

В первой главе поставлена краевая задача для цилиндрического отрезка волокна вытягиваемого с усилием P из цилиндрического участка матрицы, закреплённого сверху. Между волокном и матрицей действуют силы Кулоновского трения, вызываемые нормальным усилием на границе раздела волокно/матрица. Изначальное усилие задано (оно

возникает при изготовлении материала). В процессе вытягивания происходит перераспределение нормальных усилий и одновременно идёт износ поверхности контакта, что приводит к изменению граничных условий и дальнейшему ослаблению трения.



Трение в поверхности контакта подчиняется Кулоновскому закону:

$$\tau_s = \mu \cdot q$$

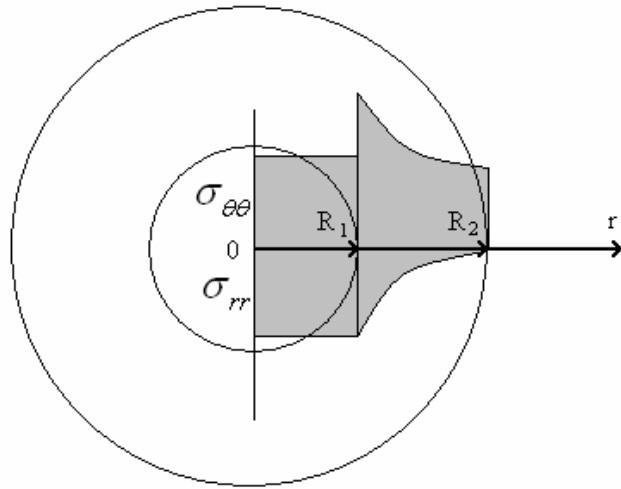
Глубина износа матрицы в поверхности контакта соответствует модели абразивного износа:

$$u_w = l_i \int_0^v \tau_s dv$$

Распределение нормальных напряжений в направлении оси Oy из соображений равновесия:

$$\frac{d\sigma_m}{dy} = \frac{2\gamma}{R_1} \tau_s$$

$$\frac{d\sigma_f}{dy} = -\frac{2}{R_1} \tau_s$$



Для произвольного поперечного сечения мы получаем классическую краевую задачу:

$$\sigma_{rr} = \frac{B}{r^2} + C$$

$$\sigma_{\theta\theta} = -\frac{B}{r^2} + C$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{E_m} (\sigma_{\theta\theta} - \nu_m (\sigma_{rr} + \sigma_m))$$

$$u_r = r\varepsilon_{\theta\theta} = -\frac{1+\nu_m}{E_m r} B + \left(\frac{1-\nu_m}{E_m} C - \frac{\nu_m}{E_m} \sigma_m \right) r$$

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = A$$

$$u_r = \left(\frac{1-\nu_f}{E_f} A - \frac{\nu_f}{E_f} \sigma_f \right) r$$

с граничным условием, зависящим от глубины износа:

$$u_{r+} - u_{r-} = u_0 - u_w$$

$$\sigma_{rr+} = \sigma_{rr-}$$

Решив её, мы получаем зависимость нормальных нагрузок в поверхности раздела волокно/матрица от нормальных напряжений и глубины износа:

$$q(y, u) = q(u_w, \sigma_f, \sigma_m) = \frac{E_m u_0 / R_1}{\alpha(1 - \nu_f) + 1 + 2\gamma + \nu_m} - \frac{E_m u_w / R_1}{\alpha(1 - \nu_f) + 1 + 2\gamma + \nu_m} + \frac{\nu_m \sigma_m}{\alpha(1 - \nu_f) + 1 + 2\gamma + \nu_m} - \frac{\alpha \nu_f \sigma_f}{\alpha(1 - \nu_f) + 1 + 2\gamma + \nu_m}$$

Выразив соответствующие величины через нормальные нагрузки:

$$u_w = l_i \mu \int_0^u q(y, t) dt$$

$$\sigma_m(y) = \int_0^y \frac{2\gamma}{R_1} \tau_s dy = \frac{2\mu\gamma}{R_1} \int_0^y q(t, u) dt$$

$$\sigma_f(y) = \frac{P}{\pi R_1^2} - \frac{\sigma_m(y)}{\gamma}$$

Получаем основное определяющее соотношение в интегральном виде:

$$q(y, u) = q_0 - A_1 \int_0^u q(y, t) dt - A_2 \int_0^{L-u} q(t, u) dt + A_3 \int_0^y q(t, u) dt$$

$$u \in [0; L], y \in [0; L - u]; q(y, u) \geq 0$$

К нему построено два приближённых решения:

1. за счёт линеаризации нормальных нагрузок q :

$$q(y, u) = K(u)y + M(u)$$

В результате интегральное уравнение преобразуется в систему:

$$\begin{cases} K(u) = -A_1 \int_0^u K(t) dt + B_3 \\ M(u) = q_0 - A_1 \int_0^u M(t) dt - A_2 K(u) \frac{(L-u)^2}{2} - A_2 M(u)(L-u) \end{cases}$$

Которая, в свою очередь, может быть решена аналитически:

$$K(u) = B_3 e^{-A_1 u}$$

$$M(u) = C(1 + A_2L - A_2u)^{\frac{A_3 - A_2}{A_2}} + \frac{A_2B_3}{2}(1 + A_2L - A_2u)^{\frac{A_3 - A_2}{A_2}} \int_0^u \frac{(L - t)(A_1L + 2 - A_1t)}{(1 + A_2L - A_2t)^{\frac{A_3}{A_2}}} e^{-A_1t} dt$$

$$C = \frac{2q_0 - A_2B_3L^2}{2(1 + A_2L)^{\frac{A_3}{A_2}}}$$

2. за счёт осреднения нормальных нагрузок q по y :
интегральное уравнение преобразуется к виду:

$$q_1(u) = q_0 - A \int_0^u q_1(u) du$$

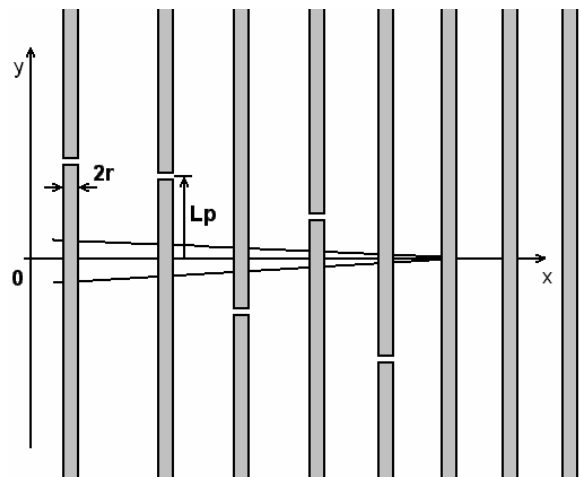
в котором оно имеет решение:

$$q_1(u) = q_0 e^{-Au}$$

Оба решения проанализированы, проведено сравнение с решением, построенным численно.

Во второй главе при помощи решения задачи о сдвиге двух цилиндров, полученного в первой главе, решена задача об определении энергии рассеивающейся на трение между волокном и матрицей при разрушении материала, дана общая оценка энергии разрушения композита.

Разрушение матрицы происходит по хрупкому сценарию. Прочность волокон является случайной величиной и определяется случайным образом распределёнными по их длине дефектами. Вероятность разрыва волокна на заданном



участке связана с распределением напряжений на этом участке формулой Вейбула. Поверхность раздела волокно/матрица характеризуется начальным напряжением трения τ_s .

При достижении этого напряжения, происходит смещение волокна относительно матрицы с абразивным износом поверхности матрицы. Длина волокон, вытягиваемых из матрицы, неодинакова и является величиной случайной. Прочность волокна задаётся распределением Вейбула:

$$P(y) = 1 - \exp \left[- \frac{1}{L_0} \int_0^y \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_0} \right)^\beta dt \right]$$

Распределение напряжений в волокне задаётся в соответствии с подходом, развитым в работах Будянского, Эванса и Хатчинсона:

$$\sigma(y) = \begin{cases} \sigma(0) - \frac{2y\tau}{R_1}, & y \in (0; L_D) \\ \sigma(0) - \frac{2\tau L_D}{R_1} - \left(\sigma(0) - \frac{2\tau L_D}{R_1} - \sigma_\infty \right) (L_C - L_D)^{-1} (y - L_D), & y \in (L_D; L_C) \end{cases}$$

Далее находятся математическое ожидание напряжения, при котором происходит обрыв волокна средняя длина волокна после обрыва:

$$\tilde{\sigma} = \int_{\sigma_\infty}^{\infty} \sigma_c \frac{d\tilde{P}}{d\sigma_c} d\sigma_c$$

$$L_p = \int_0^{L_C} y \frac{dP(y)}{dy} \Big|_{\sigma_c = \tilde{\sigma}} dy$$

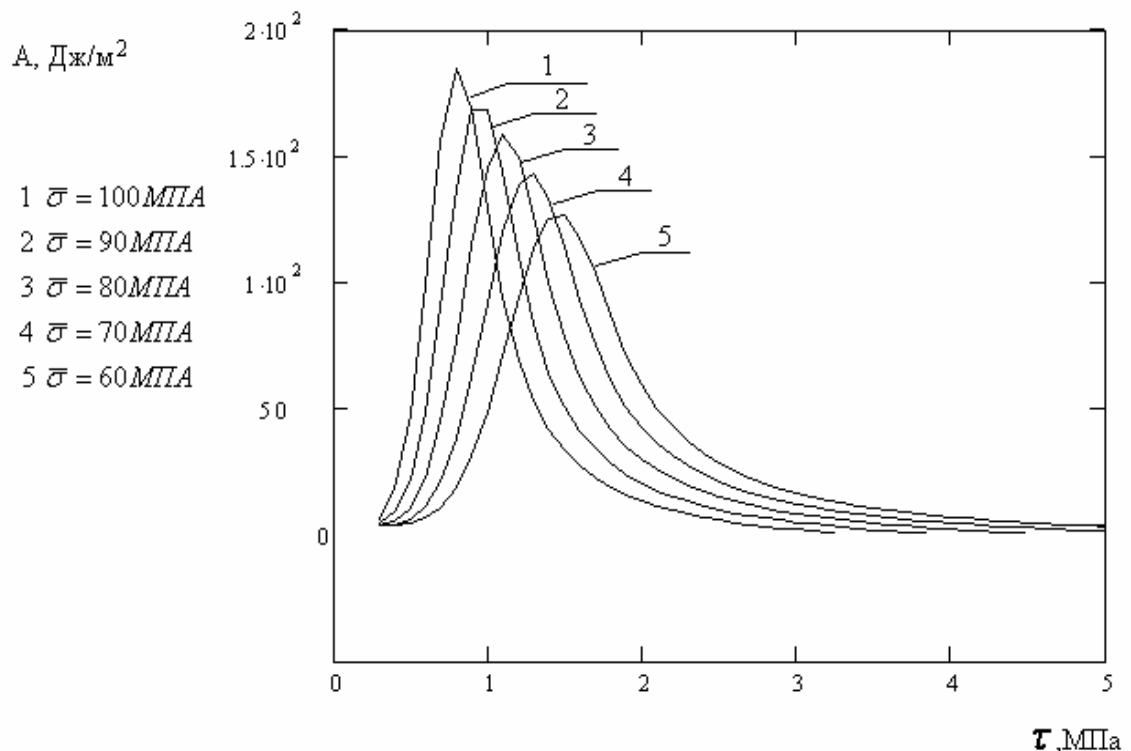
После этого, на основе оценки зависимости длины обрыва волокна от его прочности, строится модель возможности последующего обрыва волокна в процессе его вытягивания из матрицы.

$$P(\sigma_C) = P(L_P) = 1 - \exp\left[-\frac{1}{L_0} \int_0^{L_P} \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_0}\right)^\beta dt\right] \exp\left[-\frac{1}{L_0} \int_{L_D}^{L_P} \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_0}\right)^\beta dt\right] =$$

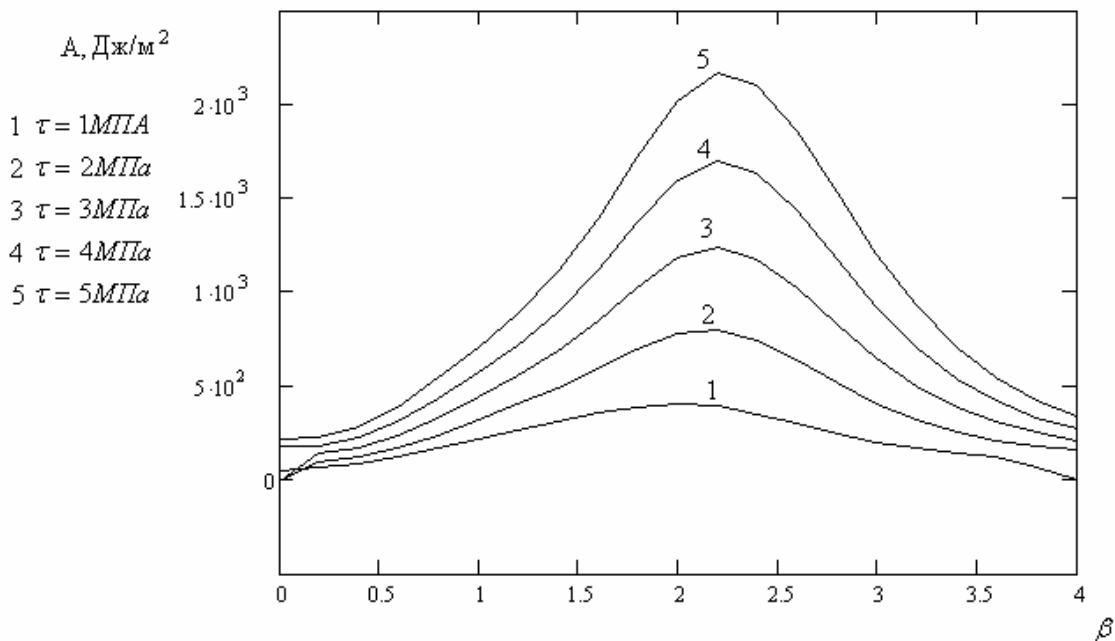
$$1 - \exp\left[\frac{L_D \left(\left(\sigma_C - \frac{2\tau L_D}{R_1}\right)^{\beta+1} - \sigma_C^{\beta+1}\right)}{L_0 \left(\frac{2\tau L_D}{R_1}\right) \sigma_0^\beta (\beta+1)}\right] \exp\left[\frac{(L_D - L_P) \left(\sigma_C - \frac{2\tau L_D}{R_1}\right)^\beta}{L_0 \sigma_0^\beta (\beta+1)}\right]$$

$$L_{p1} = \int_0^{L_P} y \frac{dP(y)|_{\sigma_C = \bar{\sigma}_2}}{dy} dy$$

Это позволяет оценить плотность энергии разрушения материала и выявить диапазон оптимальных для этого свойств волокна и границы раздела волокно/матрица.



Зависимость удельной энергии затрачиваемой на трение при вытягивании волокон из массива матрицы от свойств поверхности раздела волокно/матрица при разных нагрузках на образец.

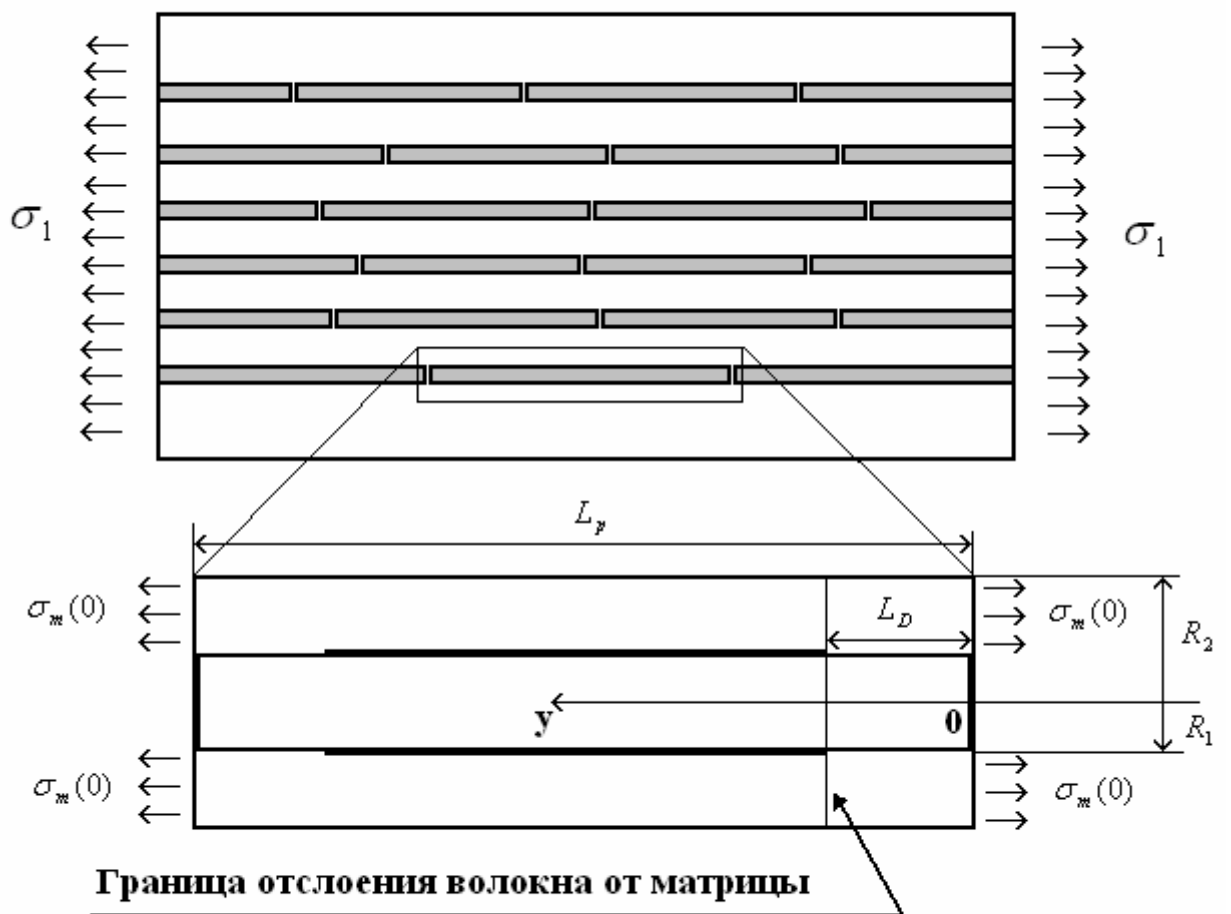


Зависимость удельной энергии затрачиваемой на трение при вытягивании волокон из массива матрицы от свойств волокна при различном трении в поверхности контакта волокно/матрица.

На первом графике видно, что существует довольно узкий диапазон, в котором находится оптимальное значение поверхностного трения для увеличения энергии разрушения материала. Нахождение этого диапазона позволяет значительно сузить рамки поиска оптимальных покрытий волокон и структур поверхности контакта волокно/матрица. Однако особенно интересным результатом представляется существование максимума рассеиваемой энергии по параметру разброса прочности волокон в пучке. Этим подтверждается вывод о том, что идеально качественные волокна меньше подходят для создания композитных материалов, чем имеющие дефекты. Более того, приведённая оценка показывает, что оптимальный разброс свойств волокон настолько велик,

что возможно наиболее целесообразным является использование волокон, искусственно раздробленных на отрезки определённой длины, для армирования композитных материалов нового поколения.

В третьей главе рассматривается волокнистый композитный материал в состоянии ползучести в направлении волокон.



В соответствии с моделью Келли-Стрита, описывающей ползучесть материала с упругим волокном и ползущей матрицей, волокна разбиваются на отрезки определённой длины, зависящей от параметров материала и нагрузки, а скорость ползучести связана с нагрузкой и качеством границы волокно/матрица следующим соотношением:

$$\frac{\sigma}{\sigma_m} = K_f a^{\frac{m}{n}} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\eta_m} \right)^{\frac{1}{n}} + K_m \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\eta_m} \right)^{\frac{1}{m}}$$

Качество поверхности контакта (сплошность интерфейса) a определяется в модели ползучести через скачок скоростей перемещений в поверхности контакта и может быть представлена в следующем виде:

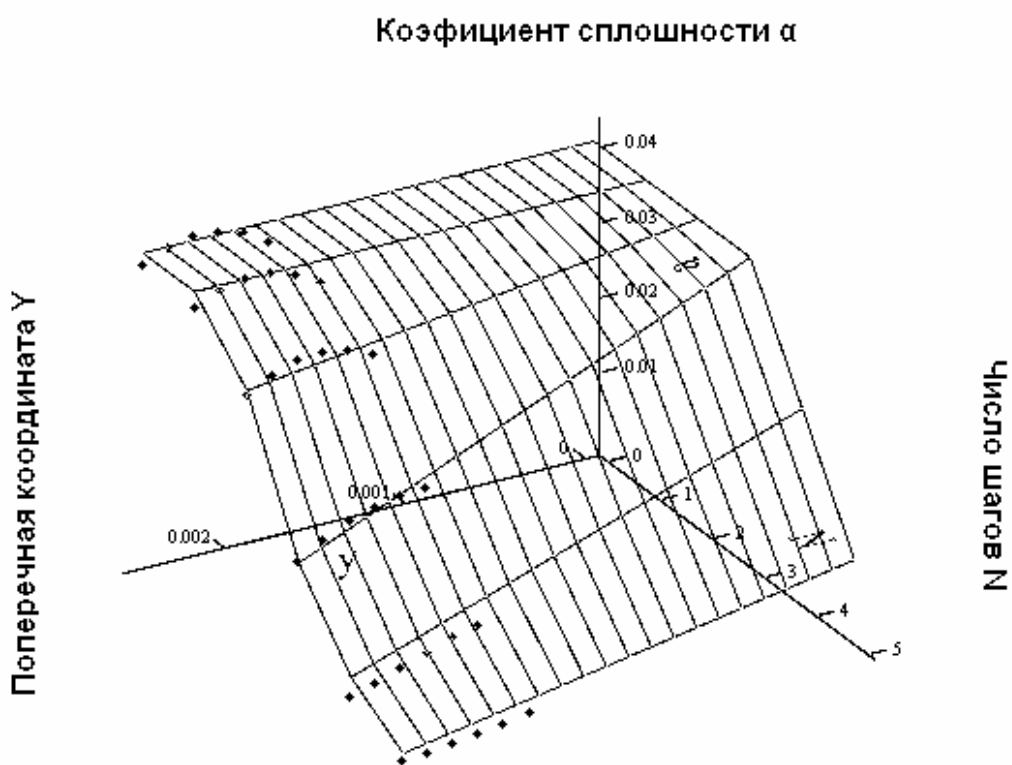
$$\frac{a}{a_0} = \frac{\int_0^{L_p} q(t, u(t)) dt}{q_0 L_p}$$

На основе этой зависимости произведён анализ испытаний ряда образцов на циклическую усталость при ползучести (испытания проводились по схеме трёхточечного изгиба) и получена экспериментальная зависимость сплошности поверхности раздела волокно/матрица от напряжения и количества циклов нагрузки/разгрузки. Далее рассматривается цилиндрический участок, содержащий отрезок волокна. Для него на основе полученных в первой главе соотношений строится следующее определяющее соотношение:

$$\begin{cases} q(y, u) = q_0(y) + T - A_1 \int_0^u q(y, t) dt - A_2 \int_{L_D}^y q(t, u) dt \\ u(y) = A_3(L_D - y) - A_4 \int_{L_D}^y \int_0^y q(t, u) dt \end{cases}$$

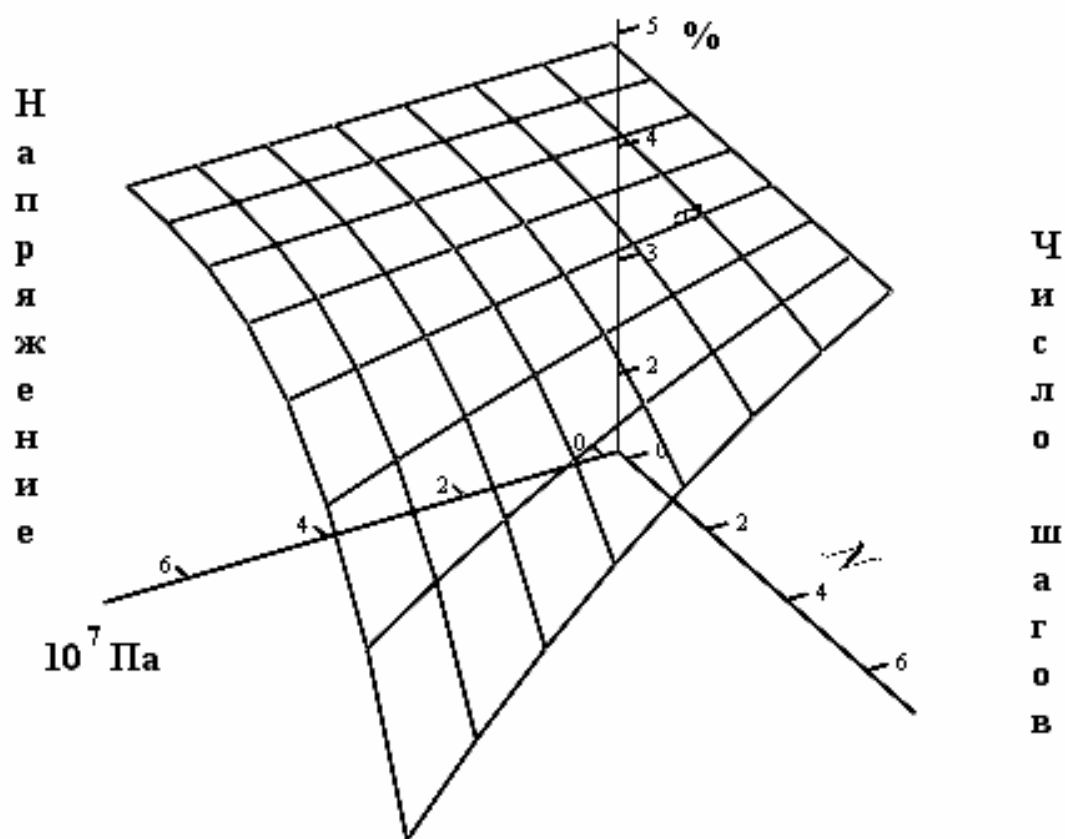
С помощью этого соотношения можно теоретически предсказать, как будет меняться a . Сравнение экспериментальных результатов с

теоретически предсказанными даёт хорошее соответствие для напряжений больших определённой величины. Наиболее вероятной причиной различия результатов видится несовершенство эксперимента связанное со сложностью напряжённо-деформированного состояния цилиндрической балки в режиме неоднородной ползучести. Результаты для областей, прилежащих к центральной оси балки (подверженных относительно малым напряжениям), получены экстраполяцией и могут содержать значительные ошибки.



Аппроксимированная зависимость сплошности поверхности раздела волокно/матрица в участке образца a1685 от удалённости участка от центральной оси образца на разных циклах нагружения.

Коэффициент сплошности α



Теоретическая зависимость сплошности поверхности раздела волокно/матрица от напряжения на разных циклах нагружения в соответствии с моделью абразивного износа в поверхности контакта волокно/матрица.

В заключении кратко сформулированы достигнутые в работе результаты, указаны перспективы их практического применения.

3. Основные результаты и выводы.

- Получены определяющие соотношения, описывающие износ поверхности контакта волокно/матрица в волокнистых композитах с хрупким волокном и хрупкой матрицей при сдвиге волокна относительно матрицы. Построены и проанализированы их приближённые решения, пригодные к инженерным расчетам.
- Получена микроструктурная модель, описывающая малоизученный класс явлений малоциклового усталости волокнистых композитов с упругим волокном и упругой матрицей. Установлена связь между этим явлением и их энергией разрушения, являющейся одним из важнейших параметров таких материалов. Это позволяет значительно сузить пространство поиска при разработке термостойких композитных материалов. Наличие теоретической модели малоциклового усталости этих материалов позволяет указать направление в борьбе с этим явлением.
- Определены оптимальные для трещиностойкости композита параметры волокон, их покрытий и поверхности контакта волокно/матрица. Это позволяет в сочетании с результатами указанными в предыдущем пункте проводить создание материалов одновременно и трещиностойких, и не подверженных малоциклового усталости при высокотемпературной ползучести.

4. Основные публикации по теме работы.

1. Хвостунков К.А. Шпенёв А.Г. (2008) «Оценка прочности поверхности раздела волокно-матрица композита из хрупких компонентов и определение энергии его разрушения» *Деформация и разрушение материалов. №7*, 29-34.
2. Хвостунков К.А. Шпенёв А.Г. (2008) «Повышение энергии разрушения композита из хрупких компонентов за счёт свойств поверхности раздела волокно/матрица» *Проблемы машиностроения и надёжности машин. №2*, 41-45.
3. Хвостунков К.А., Шпенев А.Г. «Исследование малоциклового усталости в композитных материалах нового поколения» *Вестник МГУ, в результатах конференции молодых учёных 2007*.
4. Хвостунков К.А., Шпенев А.Г. «Вклад явления вытягивания волокон с покрытием в энергетический критерий роста трещины в композите» *В результатах конференции «Проблемы механики сплошных сред и физики взрыва», Новосибирск 2007*
5. A.G. Shpenev K.A. Khvostunkov «Model of energy dissipation limit coated fiber pull-out with non-ideal interface» *In Conference Proceedings, ICCE-15, China 2007*.
6. К.А.Хвостунков. А.Г.Шпенев. «Построение модели композита со слабым интерфейсом волкно/матрица при циклическом нагружении в условиях ползучести» *Ломоносовские чтения. Секция механики. Апрель 2007 года. Тезисы*.