

На правах рукописи



Советова Юлия Валерьевна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ  
СТОХАСТИЧЕСКИ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ  
С УЧЕТОМ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ  
В УСЛОВИЯХ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

01.02.04. – Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», на кафедре механики деформируемого твердого тела.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Скрипняк Владимир Альбертович**

Официальные оппоненты:

**Киселев Сергей Петрович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры аэрогидродинамики НГТУ, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск), лаборатория «Физика многофазных сред», ведущий научный сотрудник.

**Баяндин Юрий Витальевич**, кандидат физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (г. Пермь), лаборатория физических основ прочности, научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждения науки Институт механики Уральского отделения Российской академии наук (г. Ижевск)

Защита диссертации состоится 29 декабря 2014 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.13, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (корпус № 10).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2014 года.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: [http://www.tsu.ru/content/news/announcement\\_of\\_the\\_dissertations\\_in\\_the\\_tsu.php](http://www.tsu.ru/content/news/announcement_of_the_dissertations_in_the_tsu.php)

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук



Христенко  
Юрий Федорович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы:** В условиях постоянно ведущихся работ по созданию новых конструкционных материалов сохраняет свою актуальность задача развития представлений о механизмах формирования механических и, в частном случае, прочностных свойств таких материалов. Учитывая, что большинство перспективных материалов представляют собой композиты, особую значимость представляет собой исследование влияния структуры армирования этих материалов на формирование их механических свойств. Наличие структуры, образованной элементами армирования композита, приводит, среди прочего, к появлению множественных концентраторов напряжений в объеме материала, в зоне действия которых могут активно развиваться локализованные процессы накопления повреждений, приводящие, в конечном счете, к появлению макротрещин и разрушению материала. На условия развития этих процессов существенное влияние могут оказывать механические характеристики и конфигурация межфазных слоев, образующихся вдоль границ контакта армирующих элементов и матрицы композита. Представляет интерес также исследование влияния случайного характера размещения армирующих элементов в объеме реальных композиционных материалов на механизмы формирования их механических свойств.

Одним из перспективных направлений в механике материалов, позволяющим учитывать различные эффекты, которые могут иметь место в процессе нагружения материала, является развитие многоуровневых (иерархических) представлений о строении материалов и о процессах, которые могут в них развиваться. В частности, представляет интерес исследование многоуровневого подхода к описанию процесса разрушения композита, в соответствии с которым повреждение, наблюдаемое на некотором иерархическом уровне структуры, рассматривается как кумулятивное проявление эффектов, сопровождающих процессы повреждения (разрушения) реализующиеся на более мелких уровнях структуры материала. Особую роль при этом приобретает проблема разработки согласованной системы критериев прочности для разных иерархических уровней материала.

**Целью** диссертационной работы является разработка метода прогнозирования механического поведения и предельных свойств стохастически армированных композитов с учетом накопления повреждений в компонентах в условиях квазистатического нагружения.

Для достижения поставленной цели выполнялись следующие **задачи**:

- 1) разработка многоуровневой физико-математической модели накопления повреждений в композиционном материале, учитывающей параметры его структуры армирования;
- 2) разработка методики численного моделирования механического поведения композиционного материала и определения его предельных свойств, основанная на иерархическом подходе к исследованию процесса накопления повреждений;
- 3) численное исследование влияния процесса накопления повреждений на эффективные механические и предельные свойства углеродных композитов с использованием разработанной методики.

#### **Научная новизна работы.**

- предложен метод определения предельных механических свойств композитов, основанный на иерархическом подходе к описанию процесса накопления повреждений;
- реализован перколяционный подход к определению условий макроскопического разрушения композита, основанный на результатах конечно-элементного исследования локальных свойств материала в условиях накопления повреждений;
- получены статистические оценки параметров, характеризующих локальное состояние углеродных композитов, в условиях развития процесса накопления повреждений.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

- разработана физико-математическая модель композиционного материала, позволяющая исследовать влияние параметров структуры армирования на его эффективные механические, а также предельные свойства с учетом развития процессов накопления повреждений в компонентах материала;
- на основе разработанной модели реализована численная методика прогнозирования эффективных и предельных свойств однонаправленных волокнистых стохастически армированных композитов в условиях квазистатического нагружения;
- разработанные программные средства могут быть использованы при решении задач прогнозирования эффективных упругих и прочностных свойств новых волокнистых однонаправленных композиционных материалов.

**Достоверность и обоснованность результатов**, полученных в работе, обеспечивается математической корректностью постановок задач и подтверждается сравнением результатов численного моделирования с известными теоретическими решениями и экспериментальными данными других авторов.

**Апробация работы.** Основные результаты и положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 2010 г.; VI Российская научно-техническая конференция «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», г. Екатеринбург, 2011 г.; II Всероссийская молодежная научная конференции «Современные проблемы математики и механики», г. Томск, 2011 г.; II Всероссийская Молодёжная научная конференция, посвященная 50-летию Физико-технического факультета Томского государственного университета «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», г. Томск, 2012 г.; 50-я юбилейная Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс», г. Новосибирск, 2012 г.; VII Российская конференция «Механика микронеоднородных материалов и разрушение», г. Екатеринбург, 2012 г.; 8-ая Международная научная конференция, посвященная 40-летию КарГУ им. акад. Е.А. Букетова «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент», г. Караганда, 2012 г.; XXII Всероссийская конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках», г. Пермь, 2013 г.; III Всероссийская конференция «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций», г. Новосибирск, 2014 г.; XVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и образование», г. Томск, 2014 г.; XXIII Всероссийская конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках», г. Пермь, 2014 г.

**Публикации.** Основные результаты, представленные в данной диссертационной работе, были опубликованы в 14 печатных работах, включая 2 статьи в журналах перечня, рекомендованного ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 113 страницах машинописного текста, включая 38 рисунков, 4 таблицы, список литературы из 131 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность, сформулированы цели и основные задачи работы, полученные в ней новые научные результаты, ее новизна, практическая ценность, приведены сведения об апробации работы.

**В первой главе** рассматриваются вопросы исследования композитов со случайной структурой с использованием многоуровневых представлений.

Приведен краткий обзор основных методов решения стохастических краевых задач механики композитов.

**Во второй главе** изложена физико-математическая постановка решаемой задачи. Введено в рассмотрение представления о многоуровневости процессов повреждения в структуре композита: уровень компонентов композита (микроуровень), уровень структуры армирования (мезоуровень) и уровень эффективных свойств (макроуровень). Для каждого структурного уровня записана математическая модель.

- На микроуровне справедливы соотношения теории упругости: уравнения равновесия, геометрические соотношения, физические соотношения. Для описания состояния каждого микрообъема записывается критерий прочности Цая-Ву.

- На мезоуровне по данным, о повреждениях, полученным для совокупности микрообъемов, образующих исследуемый мезообъем, вычисляется параметр повреждаемости каждой компоненты композита. Найденные значения параметров повреждаемости позволяют для каждой компоненты рассчитать локальное значение модуля упругости компоненты  $E_k$  с учетом повреждений, накопленных данной компонентой на мезомасштабном уровне.

- На макроуровне свойства объема материала характеризуются совокупностью локальных характеристик, представляющими собой результат обобщения информации о поведении материала на мезоуровне в представительной выборке точек макрообъема. Определение эффективных свойств при таком подходе сводится к статистическому анализу представительной выборки локальных свойств материала. При оценке макроскопической прочности композита предлагается использовать представления теории перколяции. По результатам численного моделирования для каждого мезообъема из состава выборки, характеризующей локальные свойства, вычисляется характеристика его поврежденности, которая приписывается соответствующей точке макрообъема. На множестве таких точек формируются кластеры, объединяющие поврежденные и неповрежденные точки. По мере возрастания нагрузки наблюдается рост и слияние кластеров поврежденных точек. При некотором значении нагрузки происходит образование соединяющего кластера поврежденных точек, что в рамках предлагаемого подхода принимается в качестве критерия перехода всего макрообъема в поврежденное (разрушенное) состояние.

**В третьей главе** изложена численная методика определения эффективных свойств композита. Непосредственное вычисление поля параметров напряженно-деформированного состояния представительного

объема стохастически армированного композита представляет собой сложную вычислительную задачу. Хаотичность структуры армирования обуславливает невозможность получения точного аналитического решения. Предлагается вместо непосредственного моделирования напряженно-деформированного состояния представительного объема оценивать эффективные свойства по представительной выборке локальных свойств композита.

Корректность предложенной методики может быть обеспечена за счет использования выборки локальных свойств такого объема, который обеспечивает ее представительность в статистическом смысле, и моделируемого объема, размеры которого обеспечивают его представительность в геометрическом смысле. Геометрическая представительность при этом должна быть обеспечена на уровне как макро-, так и мезообъема.

Использованная в работе методика оценки размеров представительного мезообъема структуры (локально-представительного объема) основана на предположении о наличии корреляционной связи между локальными свойствами и содержанием армирующих элементов в структуре материала.

Задача расчета НДС на мезоуровне представляет собой задачу нахождения напряжений и деформаций в кусочно-однородной среде, в компонентах которой происходит процесс накопления повреждений. Накопление повреждений приводит к тому, что решаемая задача физически нелинейна. Для ее решения применяется метод пошагового нагружения. По результатам решения задачи на каждом шаге по нагрузке вычисляется значение параметра повреждаемости, а также соответствующее ему значение модуля упругости. На каждом шаге по нагрузке задача решается численно с помощью метода конечных элементов.

Результат расчета эффективных свойств каждого объема на мезоуровне определяют локальные свойства материала на макроуровне. Вследствие хаотичности структуры армирования и, как следствие, неоднородности физико-механических свойств мезообъемов, свойства композита на макроуровне представляют собой случайные функции координат. Определение эффективных свойств сводится к статистическому анализу выборки свойств, определяемых в случайно выбранных точках представительного макрообъема материала. Наиболее полным описанием случайных величин является описание их закона распределения. Показано, что законы распределения локальных механических свойств хорошо аппроксимируются законами Гаусса и Вейбулла. В качестве теоретического закона распределения локальных свойств выбрано распределение Вейбулла, так как с его помощью можно описывать случайные величины, имеющие

пороговые значения, что является характерным свойством многих локальных механических характеристик, в частности, объемного соотношения компонентов материала, модуля упругости и др.

Для оценки предельных значений механических характеристик, соответствующих условиям макроскопического разрушения композита, предлагается использовать методы кластерного анализа. Проведен сравнительный анализ результатов оценки предельных характеристик модельного композита, полученных на регулярной и нерегулярной кластерных решетках, который показал незначительное различие полученных результатов. Как показывают результаты, нерегулярная решетка, образованная узлами, в которых рассчитывались локальные свойства композита, вполне пригодна для решения задачи макроскопического разрушения материала.

**В четвертой главе** содержатся результаты численных расчетов эффективных свойств стохастически армированных композитов на основе предложенной методики.

Приведены результаты оценки размеров локально-представительного объема материала, основанной на анализе зависимости корреляционной функции  $R_C$  для объемного содержания компонентов  $C$ . Рассматривались модельные объемы композита с объемным содержанием включений 7%, 14%, 20%, 30%, 50%. Рассматривались варианты, в которых диаметр включения был постоянным  $d=10$  мкм (монодисперсное наполнение), а также изменялся в заданных пределах (полидисперсное наполнение). В качестве значений механических характеристик компонентов были приняты следующие:  $E_i = 200$  ГПа,  $\nu_i = 0,30$ ,  $E_m = 3,4$  ГПа,  $\nu_m = 0,22$ , где  $E_i$ ,  $E_m$  – модули упругости волокон и матрицы соответственно,  $\nu_i$ ,  $\nu_m$  – коэффициенты Пуассона волокон и матрицы. Показано, что с увеличением относительных размеров объема  $L_f/d$  наблюдается следующий характер изменения поведения корреляционной функции  $R_C$ : при малых размерах объема функция быстро убывает, а при увеличении величины объема  $L_f/d$  значения функции почти стабилизируются. Размер, при котором наблюдается смена характера поведения корреляционной функции, принимается в качестве локально-представительного. Показано, что для монодисперсной структуры при увеличении объемного содержания включений от  $C_2=30\%$  до  $C_3=50\%$ , размер локально-представительного объема уменьшается. Для слабонаполненной структуры  $C_1=10\%$  размер локально-представительного объема можно принять равным 2 размерам диаметра включения. Показано также, что наличие полидисперсного наполнения приводит к росту значений корреляционной функции, что свидетельствует о необходимости увеличения размеров моделируемого объема для обеспечения его представительности.



Показано, что представительность в этом случае обеспечивается при выборе величины объема, равной 4 размерам диаметра включения. Следует отметить, что при увеличении объемного содержания включений размер локально-представительного объема при полидисперсном армировании уменьшается, как и в случае монодисперсного наполнения.

Решение задачи об оценке величины объема представительной выборки локальных свойств основано на положении о том, что параметры закона ее распределения не должны зависеть от объема такой выборки. На рисунке 1 показано, как меняются параметры распределения с увеличением объема выборки  $N_r$  от 25 до 300 узлов. Как следует из полученных результатов, значения параметров распределения Вейбулла локальных значений модуля упругости стабилизируются при объеме выборки  $N_r \geq 100$ , при этом величина доверительных интервалов, характеризующих разброс локальных свойств, также стабилизируется.

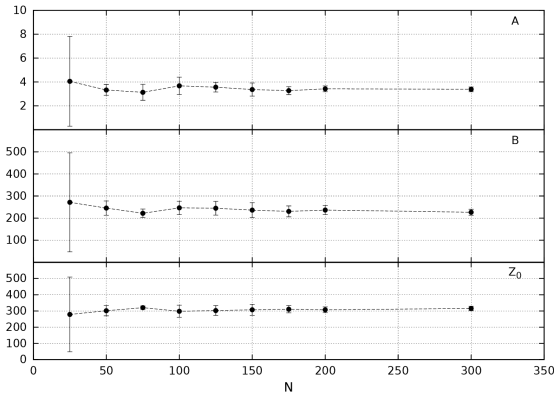


Рисунок 1. Зависимость параметров распределения Вейбулла локальных значений модуля упругости от объема выборки.

Полученные оценки представительного объема выборки локальных свойств использованы при получении оценки представительности относительных геометрических размеров модельной структуры  $L_r/d$ , где  $L_r$  – размер модельного объема структуры,  $d$  – диаметр включения. С этой целью исследовалась зависимость предельных напряжений  $\sigma$  и предельных деформаций  $\varepsilon$  от относительного размера моделируемого объема  $L_r/d$ . Результаты расчетов показаны на рисунке 2. Показано, что представительны те модельные объемы, относительный размер которых превышает  $L_r/d=6$ .

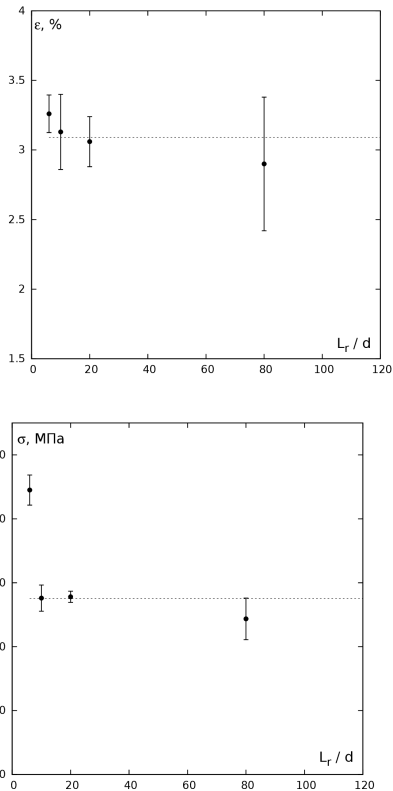


Рисунок 2 . Зависимость предельных значений деформаций и напряжений  $\epsilon$  и  $\sigma$  от относительного размера расчетной области  $L_r/d$ .

Для оценки достоверности предложенной методики проведен расчет упругих и прочностных свойств препрега AS4/8552 RC34 AW194, который представляет собой однонаправленный волокнистый углепластик. В качестве характеристик матрицы были использованы данные испанской компании «Hexcel»: модуль упругости  $\sim 4.8$  ГПа, прочность при растяжении  $\sim 124$  МПа. Прочность волокна принята равной 600 МПа, модуль упругости 60 ГПа [49]. Для данного материала компанией Lamitec-Composites GmbH (Германия) проведен цикл испытаний для данного материала, включая нагружение по нормали к ориентации волокон.

На рисунке 3 показана расчетная кривая деформирования препрега AS4/8552 RC34 AW194. Точка 1 на графике соответствует предельным значениям растягивающего напряжения и деформации, полученным при

проведении испытания компанией Lamitec-Composites GmbH, точка 2 соответствует предельным свойствам, полученным в результате численного моделирования по обсуждаемой методике. Видно, что точка 1 лежит практически на расчетной диаграмме деформирования, что говорит о хорошем качестве прогноза упругих свойств моделируемого препрега и подтверждает корректность реализации предложенной методики расчета упругих свойств композита. Завышение прогнозируемых прочностных свойств препрега по сравнению с экспериментальными результатами, может объясняться, например, тем, что в модельном материале предполагается наличие идеальной связи по границам раздела компонентов препрега, чего может не быть в реальном материале.

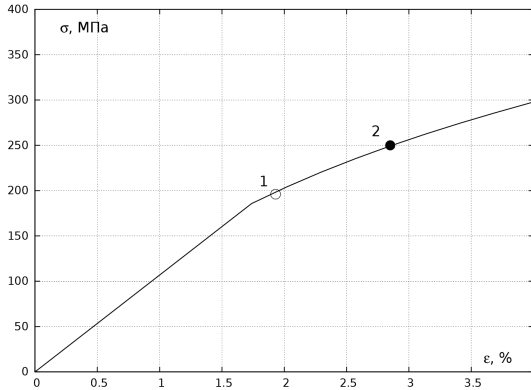


Рисунок 3. Кривая деформирования препрега AS4/8552 RC34 AW194.

Межфазный слой, образующийся в области границы раздела компонентов композита может оказывать значительное влияние на эффективные механические свойства композита [65]. Предложенная методика оценки прочности материалов была использована для оценки влияния модуля упругости и предела прочности межфазного слоя на эффективные свойства композита. В качестве модельного материала рассматривается регулярно армированный композит. Ячейка периодичности структуры армирования представляет собой квадрат, в центре которого размещается круговое включение с радиусом  $r_i$ . Межфазный слой имитируется кольцевой областью, непосредственно окружающей круговое включение. Относительный модуль упругости матрицы  $E_m/E_i$  (где  $E_i$  - модуль упругости включения) был принят равным 0.04. Относительный предел прочности матрицы  $\sigma_m/\sigma_i$  (где  $\sigma_i$  - предел прочности включения) равнялся 0.22. Механические свойства межфазного слоя варьировались. При различных сочетаниях свойств

материала моделировался процесс накопления повреждений, Определялись условия, при которых выполнен макроскопический критерий разрушения.

Анализ полученных конфигураций соединительных кластеров поврежденных узлов позволяет сделать следующие выводы: независимо от упругих свойств слоя варианты с низкой прочностью межфазного слоя характеризуются разрушением практически всего слоя и сравнительно малого объема матрицы; при максимальной из рассмотренных значений прочности слоя повреждение наблюдается только в матрице. Повышение предела прочности слоя сопровождается увеличением объема повреждений в матрице, при этом высокий модуль упругости приводит к частичному разрушению слоя, при некоторых сочетаниях прочности и жесткости слоя наблюдается частичное повреждение межфазного слоя; увеличение модуля упругости слоя может приводить к увеличению доли поврежденного объема слоя и изменению конфигурации кластеров повреждений в матрице.

На рисунке 4 в виде поверхности представлены зависимости относительной величины эффективного предельного растягивающего

напряжения  $\left(\frac{\sigma_b}{\sigma_i}\right)$  и относительной величины удельной работы разрушения  $\left(\frac{W}{\sigma_i}\right)$  от механических свойств межфазного слоя.

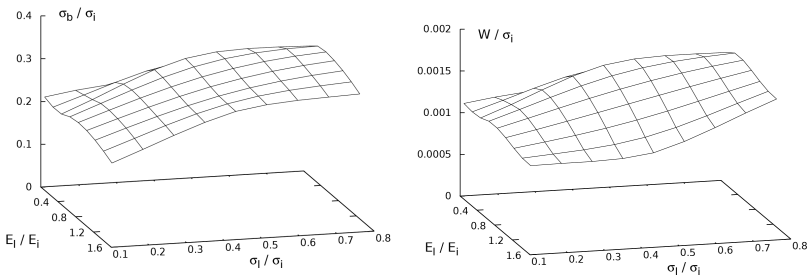


Рисунок 4. Зависимость величины эффективного предельного растягивающего напряжения  $\left(\frac{\sigma_b}{\sigma_i}\right)$  и относительной величины удельной работы разрушения  $\left(\frac{W}{\sigma_i}\right)$  от механических свойств межфазного слоя.

Видно, что при малых значениях одного параметра слоя независимо от величины другого предел прочности композита и работа разрушения имеют наименьшие значения. Увеличение любого из параметров приводит к увеличению и предела прочности, и работы разрушения примерно на 30%

относительно минимальных значений. При этом, за исключением участков минимальных значений прочности и жесткости слоя, значения предела прочности и работы разрушения композита слабо зависят от свойств слоя. В результате численного исследования механического поведения модельного композита с учетом межфазного слоя построены кривые деформирования, представленные на рисунке 5. Увеличение прочностных характеристик межфазного слоя, имеющего наиболее высокие значения модуля упругости, приводит к значительному росту значений предельной деформации (в 2 раза) и предельного напряжения. Увеличение величины предела прочности не оказывает влияния на значение предельных характеристик при наличии менее жесткого межфазного слоя. При прочном слое увеличение модуля упругости не приводит к изменению характера поведения кривой деформирования.

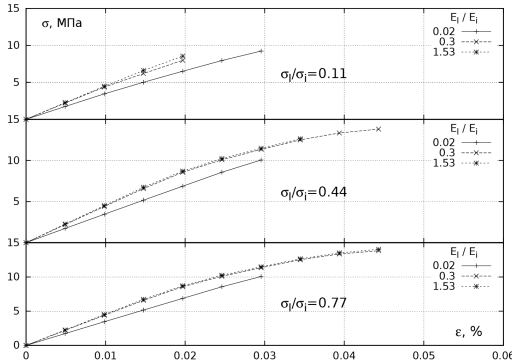


Рисунок 5. Кривые деформирования при различных сочетаниях свойств межфазного слоя.

Предложенная методика оценки прочности с использованием перколяционного критерия была использована для исследования влияния взаимного расположения пор на локальную прочность пористого материала. Полагалось, что пористый материал может рассматриваться как композит, в котором включениям приписаны существенно меньшие значения физико-механических характеристик по сравнению с матрицей. Моделировалось механическое поведение материала, в структуре которого имеются расположенные случайным образом поры. В качестве значений механических свойств матрицы и пор (включений) были приняты следующие:  $\sigma_m=450$  МПа,  $\sigma_i=100$  МПа,  $E_m=85$  ГПа,  $E_i=3,4$  ГПа,  $\nu_m=0.25$ ,  $\nu_i=0.3$ .

Специально сконструированные модели объемов композита имитируют типичные случаи взаимного расположения пор в композите: единичная пора

(1); две поры, расположенные горизонтально относительно друг друга (2g); две поры, расположенные вертикально относительно друг друга (2v); три поры (3).

На рисунке б показана зависимость относительного локального модуля упругости  $E_l^*$  ( $E_l^* = E_l / E_i$ , где  $E_l$  - локальный модуль упругости,  $E_i$  - модуль упругости более жесткого компонента композита) от продольной деформации объема. По мере возрастания количества поврежденных элементарных объемов, наблюдается снижение локального модуля упругости.

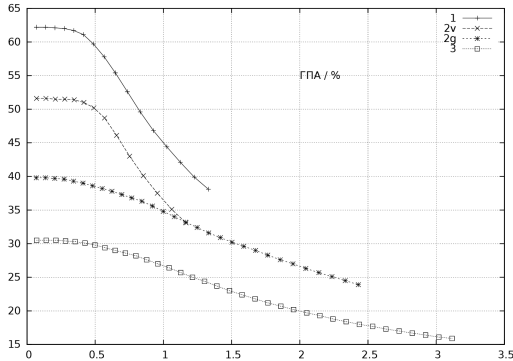


Рисунок б. Зависимость локального относительного модуля упругости от продольной деформации модельного объема.

Как следует из представленных результатов, пары вариантов 1 и 2v, а также 2g и 3 характеризуются близкими значениями предельных деформаций, при этом предельные деформации, характерные для каждой пары, существенно отличаются. Совпадение предельных деформаций означает, что с точки зрения перколяционного критерия структуры в каждой из таких пар являются практически идентичными. При этом структуры 2v и 2g, относящиеся к разным парам, имеют равное объемное содержание включений и близкие объемы кластеров повреждений. Таким образом, из полученных результатов следует, что перколяционный критерий прочности при использовании на мезоуровне оказывается чувствительным к конфигурации элементов структуры материала относительно направления нагружения.

Изложенный подход к оценке эффективных упругих и прочностных свойств был использован для исследования влияния объемного соотношения компонентов волокнистого однонаправленного углепластика на его эффективные механические свойства. Объемное содержание волокон варьировалось в пределах от 7 % до 50 %.  $E_i = 200$  ГПа,  $\nu_i = 0,30$ ,

$E_m = 3,4$  ГПа,  $\nu_m = 0,22$ , где  $E_i$ ,  $E_m$  – модули упругости волокон и матрицы соответственно,  $\nu_i$ ,  $\nu_m$  — коэффициенты Пуассона волокон и матрицы.

На рисунке 7 показаны эффективные диаграммы деформирования модельных материалов

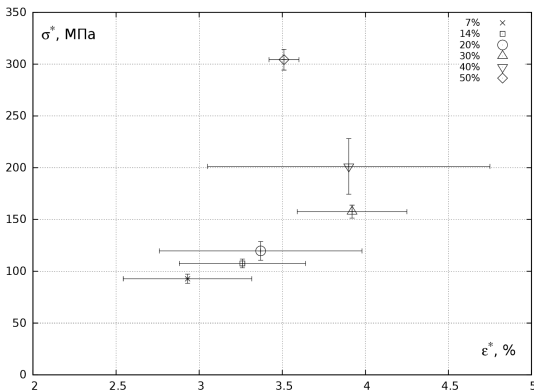
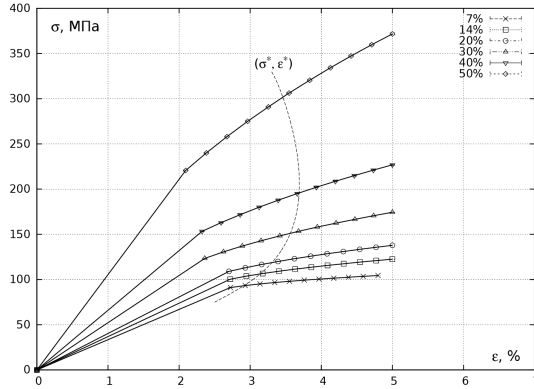


Рисунок 7. Диаграммы деформирования модельных материалов.

Рисунок 8. Предельные значения главного напряжения и локальной деформации.

Видно, что во всех рассмотренных случаях накопление повреждений с ростом деформации материала приводит к существенному снижению упругих свойств композита. Видно также, что если диаграммы деформирования модельных материалов с содержанием армирующих волокон 7 %, 14 % и 20 % расположены достаточно близко друг от друга, то увеличение доли волокон до 30 % и более приводит к существенному

возрастанию упругих свойств материала, которые растут тем более быстро, чем выше содержание волокна в композите.

На рисунке 8 представлены предельные значения главного напряжения ( $\sigma_1$ ) и локальной деформации ( $\epsilon_1$ ), полученные в результате проведенных расчетов. Точки, показанные на рисунке, соответствуют моменту образования соединительного кластера повреждений в представительном объеме материала. Как видно из представленных на рисунке данных, предельные значения главного напряжения возрастают при увеличении объемного содержания армирующих волокон. В отличие от этого, зависимость предельного значения деформации удлинения от содержания волокон является существенно немонотонной: наблюдается рост предельной деформации при увеличении содержания волокон от 7 % до 30 %, увеличение содержания волокон от 30 % до 40 % не приводит к существенному изменению величины предельной деформации, дальнейшее увеличение доли армирующих элементов до 50 % сопровождается снижением величины предельной деформации.

На рисунке 9 приведена полученная в результате моделирования зависимость модуля упругости композита от объемного содержания армирующих волокон. Для сравнения на графике показаны верхняя (кривая 1) и нижняя (кривая 2) границы вилки Хашина-Штрикмана. Видно, что полученная зависимость практически совпадает с нижней границей вилки, хотя с увеличением содержания армирующих элементов до 30 % и более значения упругих модулей отклоняются в сторону верхней границы вилки.

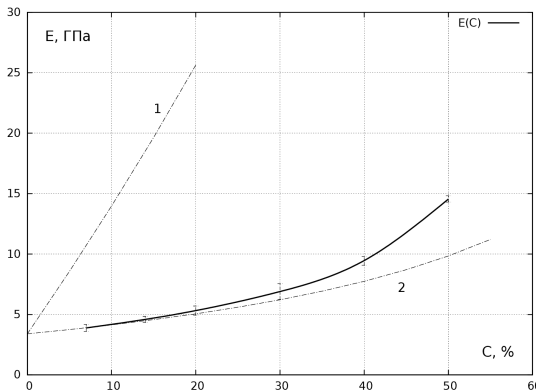


Рисунок 9. Зависимость модуля упругости композита от объемного содержания армирующих волокон.



**В заключении** изложены основные результаты диссертационной работы.

1. Разработана многоуровневая физико-математическая модель механического поведения композиционного материала с вязкопластической матрицей, позволяющая учитывать геометрию и взаимное расположение, объемное содержание армирующих элементов, а также особенности развития процесса накопления повреждений на разных структурных уровнях материала.
2. Разработана методика численного моделирования механического поведения однонаправленного волокнистого композиционного материала и определения его предельных свойств в условиях квазистатического нагружения по нормали к направлению армирования. Методика основана на иерархическом подходе к описанию процесса накопления повреждений и включает использование критериев прочности Цая-Ву на микроуровне, критерия прочности объемного типа на мезоуровне, перколяционного критерия на макроуровне. Показано, что перколяционный критерий прочности волокнистых композитов является чувствительным к локальной конфигурации армирования относительно направления нагружения.
3. Получены новые теоретические оценки геометрических параметров представительных объемов композитов с однонаправленным волокнистым армированием, выполненные на основе анализа корреляционных характеристик локальных значений объемных соотношений компонентов для случаев монодисперсного и полидисперсного наполнений.
4. Получены зависимости эффективных упругих и прочностных свойств композитов с однонаправленным волокнистым армированием от механических свойств межфазного слоя с учетом повреждений структуры. Получены оценки поперечного модуля упругости и предельных характеристик препрега на основе углеродного волокна AS-4.
5. Получены результаты компьютерного моделирования, устанавливающие общие закономерности влияния объемного содержания углеродных волокон в диапазоне 7-50% на предельные характеристики карбополимерного композита. Обнаружено, что увеличение содержания волокон в диапазоне от 7 до 30 % приводит к росту предельной деформации до макроскопического разрушения, увеличение содержания волокон в диапазоне от 30 до 40 % не приводит к существенному изменению величины предельной деформации, увеличение доли армирующих элементов от 40 до 50 % сопровождается снижением величины предельной деформации.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

*Статьи, опубликованные в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций:*

1. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н., Скрипняк В.А. Многоуровневый подход к определению эффективных свойств композита с учетом повреждаемости // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16, № 5. – С. 59-65. – 0,57/0,19 п.л.

2. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н., Скрипняк В.А. Многоуровневый подход к исследованию влияния объемного соотношения компонентов хаотически армированного волокнистого углепластика на его механические характеристики // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2014. – № 2(28). – С. 77-89. – 0,625/0,21 п.л.

*Публикации в других научных изданиях:*

3. Советова Ю.В. Многоуровневый подход к оценке прочностных свойств композитов // Сборник материалов всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – С. 234-236. – 0,16/0,16 п.л.

4. Сидоренко Ю.Н., Советова Ю.В. Многоуровневый подход к описанию накопления повреждений в композиционном материале // Тезисы докладов VI Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций». – Екатеринбург, 2011. – 0,08/0,04 п.л.

5. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н. Численный алгоритм решения задачи об оценке прочности нерегулярно армированного композита// Материалы II Всероссийской молодежной научной конференции «Современные проблемы математики и механики». – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2011. – С. 310-314. – 0,16/0,08 п.л.

6. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н. Перколяционный подход к оценке прочности композита//Труды Томского государственного университета. – Т. 282. Серия физико-математическая: Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики: Материалы II Всероссийской Молодёжной научной конференции, посвященной 50-летию Физико-технического факультета Томского государственного университета. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2012. – С. 133-135. – 0,16/0,08 п.л.

7. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н. Моделирование поведения нерегулярно армированного композита с учетом повреждаемости // Тезисы докладов 50-й юбилейной Международной научной студенческой

конференции «Студент и научно-технический прогресс». – Новосибирск, 2012. – С. 282. – 0,08/0,04 п.л.

8. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н. Сравнительная оценка возможных подходов к построению критерия макроскопической прочности композита // Тезисы докладов VII Российской конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение». – Екатеринбург, 2012. – С. 33. – 0,06/0,03 п.л.

9. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н. Современные подходы к прогнозированию эффективных механических свойств композиционных материалов с учетом хаотичности реальной структуры армирования // Материалы 8-й Международной научной конференции, посвященной 40-летию КарГУ им. акад. Е.А. Букетова «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент». – Караганда: Изд-во КарГУ, 2012. – С. 264–269. – 0,38/0,19 п.л.

10. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н., Скрипняк В.А. Оценка величины локально-представительного объема композита на основе корреляционного анализа объемного содержания компонентов // Математическое моделирование в естественных науках / XXII Всероссийская конференция молодых ученых и студентов. – Пермь, 2013. – 0,06/0,02 п.л.

11. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н. Анализ прочностных свойств хаотически армированного композита на основе многоуровневого подхода // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – № 1(20). – С. 41-43. – 0,16/0,08 п.л.

12. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н. Влияние локальной пористости на характер процесса накопления повреждений // Материалы III Всероссийской конференции «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций». – Новосибирск, 2014. – 0,06/0,03 п.л.

13. Советова Ю.В., Скрипняк В.А. Исследование механического поведения регулярно армированного композита с учетом межфазного слоя // Материалы XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и образование». – Томск, 2014. – 0,16/0,08 п.л.

14. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н., Скрипняк В.А. Оценка влияния механических свойств межфазного слоя на особенности разрушения композита // Тезисы докладов XXIII Всероссийской конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках». – Пермь, 2014. – 0,06/0,02 п.л.