

## Отзыв официального оппонента

на диссертацию Советовой Юлии Валерьевны «Моделирование механического поведения стохастически армированных композитов с учетом накопления повреждений в условиях квазистатического нагружения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**Актуальность.** Диссертационная работа Советовой Юлии Валерьевны «Моделирование механического поведения стохастически армированных композитов с учетом накопления повреждений в условиях квазистатического нагружения» посвящена численному исследованию механического поведения стохастически армированных композитов с полимерной матрицей. Полимерные композиты, армированные фрагментами высокомодульных волокон, нановолокнами, углеродными нанотрубкам находят все большее применение в машиностроении, авиастроении и других отраслях промышленности. В связи с этим, актуальными становятся исследования в области прогнозирования упругих, прочностных свойств наполненных композитов. Особый интерес вызывает влияние процесса накопления повреждений в компонентах композита в условиях нагружения на механическое поведение материала. При моделировании процессов, протекающих в условиях увеличения нагрузки, широко применяются многоуровневые подходы. Свойства материала в целом представляют собой кумулятивный эффект проявления свойств каждого структурного уровня.

Тематика исследований диссертационной работы Советовой Ю.В., связанная с развитием подходов к прогнозированию механического поведения композиционных материалов в рамках многоуровневых представлений, является, несомненно, актуальной.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 113 страницах машинописного текста, список литературы из 131 наименования.

**Во введении** изложена актуальность диссертационного исследования, указаны цели, основные задачи работы, ее новизна, практическая ценность, сформулированы полученные новые научные результаты, приведены сведения об апробации работы.

**В первой главе** приведен краткий обзор методов прогнозирования механического поведения конструкционных материалов. Особое внимание уделяется вопросам влияния структуры армирования на эффективные свойства материала в целом, развитию

многоуровневых представлений к описанию процессов накопления повреждений в компонентах композита.

**Во второй главе** изложена постановка задачи о нагружении иерархической структурированной среды в рамках многоуровневого подхода к описанию процессов деформации и повреждения. Обсуждается многоуровневая модель композита, использующая для описания локальных свойств компонентов и материала на каждом рассматриваемом структурном уровне статистических характеристик некоторых локальных механических свойств и объемного распределения упрочняющих включений.

**В третьей главе** изложена численная методика определения эффективных свойств композита. Методика оценки размеров представительного объема модельной структуры на мезоуровне основана на предположении о наличии корреляционной связи между локальными свойствами и содержанием армирующих элементов в структуре материала. На макроуровне свойства композита вследствие хаотичности структуры армирования представляют собой случайные функции координат, в качестве описания которых использовано распределение Вейбулла. Для оценки предельных значений механических характеристик, соответствующих условиям макроскопического разрушения композита, используются методы кластерного анализа.

**В четвертой главе** содержатся результаты численных расчетов эффективных свойств стохастически армированных композитов на основе предложенной методики. Приведены результаты расчета упругих и прочностных свойств препрега AS4/8552 RC34 AW194 применяемого в элементах конструкций авиакосмического назначения. Показано хорошее согласие теоретического прогноза упругих и деформационных свойств моделируемого препрега с экспериментальными данными, что подтверждает применимость предложенной методики для прогнозов упругих и прочностных свойств композитов, создаваемых на основе препрега.

Предложенная в работе методика оценки прочности материалов использована для исследования механического поведения композита с учетом свойств межфазного слоя: показана оценка влияния механических свойств межфазного слоя на эффективные свойства и на особенности накопления повреждений в композите.

Показано, что перколяционный критерий прочности при использовании на мезоуровне оказывается чувствительным к конфигурации элементов структуры материала относительно направления нагружения.

Проведено исследование влияния объемного соотношения компонентов волокнистого однонаправленного углепластика на его эффективные механические свойства. Установлено, что увеличение содержания волокон в диапазоне от 7 до 30 %

приводит к росту предельной деформации, увеличение доли армирующих элементов от 40 до 50 % сопровождается снижением величины предельной деформации.

В заключении диссертации сформулированы результаты работы и основные выводы по проведенному исследованию.

**Научная новизна** рассматриваемой диссертационной работы заключается в разработке подхода к определению эффективных механических свойств стохастически армированных композитов, основанного на многоуровневых представлениях к описанию процесса накопления повреждений в компонентах материала. К определению условий макроскопического разрушения композита применим перколяционный подход, основанный на результатах конечно-элементного исследования локальных свойств материала в условиях накопления повреждений.

**Практическая значимость** диссертации заключается в возможности применения разработанных программных средств при решении задач прогнозирования эффективных упругих и прочностных свойств новых стохастически армированных композиционных материалов с полимерной матрицей, упрочненных высокомодульными прочными волокнами или их фрагментами.

**Достоверность результатов**, полученных в работе, обеспечивается математической корректностью постановок решаемых задач, выбором подходящего метода численного решения и подтверждается непротиворечивостью полученных результатов численного моделирования с известными теоретическими решениями и экспериментальными данными других авторов.

**Результаты диссертации опубликованы** в 14 печатных работах, включая 2 статьи 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.

**Содержание автореферата** правильно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертации прошли апробацию на Всероссийских и международных научных конференциях и известны специалистам.

**По диссертационной работе Советовой Ю. В. имеются следующие замечания:**

1. В п. 4.2.1. диссертации исследовалось влияние прочностных свойств межфазного слоя между матрицей и включением на процесс накопления повреждений при растяжении композита. Поскольку толщина межфазного слоя и его механические характеристики задавались произвольно, то полученные результаты носят формальный характер. Для апробации методики и исследования влияния межфазного слоя было бы полезно сравнить результаты расчетов по данной

методике с результатами расчетов задачи о разрушении композита матрица – включение, выполненное методом молекулярной динамики (см. работу Белай О.В., Киселев С.П. Численное моделирование деформирования и разрушения пластины нанокompозита «медь-молибден» при одноосном растяжении методом молекулярной динамики // Физическая мезомеханика, 2010, Т. 13, № 4. С. 25 – 24). Расчеты методом молекулярной динамики показали, что межфазный слой насыщен дефектами, что приводит при растяжении композита зарождению пор в этом слое, локализации деформации и разрушению композита.

2. В данной диссертации разрушение композита на макроуровне определяется путем построения поля кластеров повреждений, так что композит считается разрушенным при возникновении соединяющего кластера повреждений. Однако разрушение образца при растяжении может произойти раньше, чем возникнет соединяющий кластер микроповреждений, путем зарождения и роста магистральной трещины. Игнорирование этого механизма разрушения может приводить к завышению рассчитанных прочностных свойств композита. В задаче о деформации препрега рассчитанные значения предельной деформации и напряжения превосходят экспериментальные значения (см. рис. 23).

Данное замечание относится также к п. 4.3., где численно моделировались ухудшение прочностных свойств пористого материала за счет накопления повреждений без учета зарождения и роста трещин. Отметим, что численные расчеты плоской деформации и разрушения слоя графена содержащего пору, выполненные методом молекулярной динамики (см. работу Киселев С.П., Жиров Е.В. Численное моделирование деформирования и разрушения графена при одноосном растяжении методом молекулярной динамики // Физическая мезомеханика, 2012, Т. 15, № 2. С. 69 – 76) показывают, что разрушение происходит путем распространения трещин от поры к границам слоя графена.

3. В п. 4.3. (стр. 83) значения механических характеристик пор выбраны некорректно, так как модуль Юнга в порах должен быть равным нулю.
4. В диссертации имеются опечатки: на стр. 77 в подписи к рис. 25 три раза приведены ссылки на рис. а) – в), которые должны относиться к рис. а) – и).

Указанные выше замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Диссертация представляет законченную научную квалификационную работу, в которой предложено решение задачи о прогнозировании механического поведения композиционного материала с учетом параметров структуры армирования и влияния на эффективные свойства процессов накопления повреждений в компонентах материала.

Диссертация «Моделирование механического поведения стохастически армированных композитов с учетом накопления повреждений в условиях квазистатического нагружения» полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения научных степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. N 842, к кандидатским диссертациям (П.9), а ее автор, Советова Юлия Валерьевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Я, Киселев Сергей Петрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Советовой Юлии Валерьевны, и их дальнейшей обработкой.

Официальный оппонент  
ведущий научный сотрудник лаборатории №6 «Физика многофазных сред»  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки  
Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения  
Российской академии наук,  
профессор кафедры аэрогидродинамики НГТУ  
доктор физико-математических наук,  
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская 4/1,  
E-mail: kiselev@itam.nsc.ru  
www.itam.nsc.ru



Киселев Сергей Петрович

«11» 12 2014 г.

Подпись С.П. Киселева заверяю:

Ученый секретарь ИТТМ СО РАН  
к.т.н.




Меламед Б.М.