

Отзыв

официального оппонента, доктора технических наук, профессора Сапожникова Сергей Борисовича на диссертационную работу **Малахова Андрея Викторовича** на тему «Моделирование полимерных композитных материалов с неоднородной структурой армирования на основе криволинейных траекторий волокон», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Актуальность темы. Поиск и разработка новых методов проектирования композитных структур с криволинейными траекториями армирования, позволяющими максимально реализовать потенциал волокнистых композитов, продолжает оставаться актуальным направлением на протяжении десятков лет. В данной работе новый метод 3D-печати непрерывным жгутом волокон, пропитанных полимером, использован как инструмент создания рациональных укладок волокон в зонах концентрации напряжений, а для управления этим инструментом разработана соответствующая теоретическая база. Привлекает к этой теме «биоподобность» таких структур. Развитие технологий укладки пучков волокон по криволинейным траекториям порождает на каждом этапе возрастание интереса к этой теме как в научной сфере, так и на практике.

Анализ содержания диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации 132 страницы, включая 14 таблиц и 78 рисунков. Список литературы состоит из 151 источника.

В первой главе приведён обзор природных композитных материалов, позволяющих за счёт неоднородности и непрямолинейности клеточной структуры создавать эффективные конструкции. *Достаточно поверхностное описание этих конструкций, практически не связанных с задачами диссертации, тем не менее, сопровождается 32 ссылками из общих 151.* В п.1.3 «Компьютерное проектирование структур армирования» даются ссылки лишь на зарубежные работы, наиболее близкие по сути к теме диссертации. *К сожалению, в обзоре автор обошёл своим вниманием многочисленные работы отечественных авторов, рассматривавших проблемы криволинейной укладки волокон в композитных конструкциях (Г.И. Брызгалин, В.А. Комаров и др.), приведя в тексте лишь их фамилии для формальности.*

В обзоре рассмотрены также различные технологические приёмы, позволяющие получать структуры с криволинейным расположением волокон. Делается вывод о перспективности технологии 3D-печати,* которая далее использована в работе.

В качестве комментария должен отметить, что низкая максимальная объёмная доля волокон при 3D-печати существенно снижает практический интерес к данному способу изготовления, так как объём полимерной матрицы оказывается велик и достижение минимальной массы конструкции (в сравнении с другими способами, типа использования препрегов однонаправленных волокон) при заданных нагрузках становится проблематичным.

Во второй главе (тоже обзорной, но выделенной почему-то в самостоятельную главу) приводятся сведения из классической теории упругости ортотропных материалов и теорий прочности с учётом различных механизмов разрушения. *Основным материалом для дальнейших расчётов принят известный композит на основе углеродных волокон IM7 и терморезактивной (эпоксидной) матрицы типа 8552 с объёмной долей волокон около 60%, тогда как при 3D-печати использован совсем другой материал - пучок арамидных волокон с матрицей из термопласта PLA – с объёмной долей волокон до 40%.*

В завершении (и на основании!) критического обзора принято указывать перечень актуальных задач к разработке в данной диссертации, однако, в тексте (см. параграф «Выводы по главе 2») этого нет, но есть лишь одна фраза: «Важный результат состоит в разработке алгоритмов, позволяющих моделировать процессы последовательного накопления повреждений с учетом деградации различных упруго-прочностных свойств по мере развития различных видов разрушения волокон или матрицы», которую, очевидно, следует считать основной задачей работы. Отмечу, перечень задач к разработке приведен до обзора, что нелогично.

В третьей главе подробно рассматривается методика численной реализации построения непрерывных траекторий волокон вдоль направлений максимальных главных напряжений, на основе которых создаётся неоднородная структура армирования с переменной объёмной долей волокон для композитных пластин с концентраторами напряжений. В предложенной схеме постулируется отсутствие касательных напряжений (это естественно), но неявно – присутствие трансверсальных напряжений (второе главное напряжение в зонах искривления волокон всегда ненулевое). Таким образом «равноправие»

трансверсальных и касательных напряжений нарушается, хотя сдвиговая прочность полимерных композитов, как правило, заметно выше трансверсальной прочности (см., например, учебник *E.J.Barbero Introduction to composite materials design, CRC Press, 2011*). Уж, если численно проводится проверка прочности композитных доменов после первого приближения, то стоило бы оставить и касательные напряжения в схеме. *Можно рассматривать это предложение как перспективе для развития работы в будущем.*

В четвертой главе численно рассмотрены различные варианты деформирования и разрушения пластин с отверстиями. Детально проанализирована кинетика повреждения матрицы и волокон и показано, что повышение предела пропорциональности происходит из-за задержки разрушения криволинейных волокон у концентратора. Для иллюстрации эффективности метода предложена конфигурация образцов с отверстиями (п.4.2), которые полностью перерезают волокна. Но, по моему мнению, эта иллюстрация излишняя, так как очевидна необходимость искривления волокон «по линиям тока жидкости вокруг препятствий». Ослабленное продольное сечение между отверстиями работает преимущественно на срез и там будет эффективна косоперекрестная укладка однонаправленных слоёв под углами $\pm\varphi$ ($\varphi < 45^\circ$).

В п.4.3 автор численно рассмотрел схему проушины, т.е. растяжения пластины с нагруженным отверстием. Кстати, эта схема рассматривается (по предложению проф. В.А. Комарова, но не отмеченного автором вообще!) уже ряд лет в качестве «полигона» для проверки критериев прочности композитов.

В главе 5 достаточно подробно описана технология 3D-печати на принтерах COMBOT-I и FDM Bonsai Lab. Однако, она слабо связана с предыдущим материалом, так как, повторюсь, в ней используется термопластичная матрица и арамидные волокна, а в разработанной выше методике проектирования криволинейных структур из термореактивных композитов пластичность матрицы не учитывается. Автору приходится экспериментальные результаты оценки прочности приводить без сравнения с расчётными.

Диаграммы деформирования образцов с нагруженным отверстиями имеют немонотонный характер, но это никак не комментируется, так как нет ни модельных расчётов, ни анализа, например, событий акустической эмиссии.

Дискуссионным является также факт приведения отличающихся в 5-6 раз модулей упругости при растяжении и сжатии вдоль волокон (Табл.5.1). Нет ссылки на источник данной недостоверной информации.

Иными словами, глава 5 носит лишь иллюстративный характер, а выводы по главе – пока неоправданные.

Заключение в основе своей корректное, но содержит ряд личных мнений автора без связи с работой. В частности, мнение о широком использовании в будущем разработанной методики (первый абзац) весьма преждевременное.

В третьем абзаце глобальное заключение о перспективности криволинейного расположения волокон следовало бы сопроводить указанием ограничений, например, «при той же объёмной доле», «при неизменности направления приложения нагрузки» и т.п.

Эффективность нового метода поиска рациональных траекторий расположения волокон и технологий изготовления пока не доказана, так как в экспериментах (глава 5) нет монотонного поведения материала с концентратором под нагрузкой хотя бы до предела пропорциональности, на который обращено много внимания в предыдущих главах.

Научная новизна диссертационной работы, по мнению оппонента, состоит в следующем:

1. Разработан новый способ построения траекторий главных напряжений в образцах из неоднородных анизотропных композитов с концентраторами напряжений для укладки волокон, отличающийся возможностью учёта переменной объёмной доли волокон в композите.
2. Разработана новая методика использования комбинированных структур из слоёв композитных материалов, отличающаяся усилением традиционных однонаправленных структур криволинейными жгутами в рамках аддитивных технологий изготовления.

Практическая и теоретическая значимость результатов работы заключается в потенциальной эффективности криволинейного армирования пластин с концентраторами при условии повышения объёмной доли волокон, снижении пористости и использовании разработанной методики армирования.

Достоверность научных результатов и обоснованность выводов вполне достаточная, с учётом сложности изготовления и проведения экспериментов на образцах, полученных 3D-печатью.

Замечания отмечены *курсивом* в соответствующих разделах, посвященном анализу содержания диссертации. Они носят в основе своей редакционный характер и несущественно снижают ценность полученных результатов.

Соответствие диссертационной работы указанной специальности. Диссертационная работа Малахова А.В. по содержанию и полноте изложенного материала соответствует паспорту специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Заключение. Диссертационная работа соответствует требованиям пп.9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в редакциях от 21.04.2016 № 335 и 12.10.18 № 1168), а ее автор, **Малахов Андрей Викторович**, достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тел.

Официальный оппонент,
главный научный сотрудник кафедры технической механики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

доктор технических наук, профессор

Сергей Борисович Сапожников

«5» апреля 2024



Подпись Сапожникова Сергея Борисовича заверяю:

ВЕРНО
Начальник службы
делопроизводства ЮУрГУ
Н.Е. Циулина

Сапожников Сергей Борисович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры технической механики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Адрес организации: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», 454080, г. Челябинск, проспект им. В.И. Ленина, 76

Телефон: +7(912)7957271

E-mail: sapozhnikovsb@susu.ru

Наименование научной специальности, по которой была защищена докторская диссертация: 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

С отзывом ознакомлен

16.04.2024

Моис