

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ФГБУН «Институт
прикладной механики Российской
академии наук» (ИПРИМ РАН),
д.т.н., Власов Александр Николаевич



23.04.2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Малахова Андрея Викторовича «Моделирование полимерных композитных материалов с неоднородной структурой армирования на основе криволинейных траекторий волокон», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела».

Актуальность диссертационного исследования

Традиционно в однонаправленных композитных материалах применяется армирование прямолинейными равномерно распределенными по объему волокнами, которое не является оптимальным для конструкций, если в них возникают неоднородные поля напряжений. Это связано с тем, что при использовании равномерного однонаправленного армирования жесткость композитного материала всюду одинакова. Совсем другой тип армирования наблюдается в природных материалах, где волокна искривляются возле концентраторов напряжений, как, например, в древесине в окрестности сучка, тем самым создавая переменную жесткость за счет криволинейных волокон и адаптируя их под неоднородные поля напряжений.

Диссертация посвящена разработке метода проектирования композитных материалов с неоднородной структурой армирования с использованием криволинейных траекторий волокон. Переход от прямолинейного равномерного армирования к криволинейному неравномерному позволяет обеспечить переменную жесткость композитной структуры, которую можно согласовать с неоднородными полями напряжений и наилучшим образом сформировать структуру композитного материала. Поэтому **актуальным** представляется поиск и разработка нового метода моделирования композитных структур с криволинейным неравномерным армированием.

Целью диссертационного исследования является развитие методов рационального проектирования композитных материалов с использованием криволинейных траекторий волокон с учетом действующих полей напряжений.

Научная новизна работы состоит в том, что:

1. Разработан метод построения криволинейных траекторий волокон, совпадающих с направлением максимальных главных напряжений;
2. Разработан новый метод моделирования композитных материалов на основе криволинейных траекторий волокон, учитывающий изменения как ориентации волокон, так и расстояния между ними;
3. Выполнен численный анализ напряженно-деформированного состояния композитных материалов с криволинейной структурой армирования;
4. На основе учета деградации свойств материала проведено моделирование прогрессирующего разрушения для спроектированных композитных структур с криволинейным армированием;
5. С помощью 3D печати были изготовлены различные композитные пластины с криволинейными волокнами, траектории которых получены по разработанному методу проектирования. Результаты испытаний на растяжение этих пластин показали, что эффективность композитов может быть повышена за счет перехода от однонаправленного армирования к криволинейному.

Достоверность полученных результатов обеспечивается строгим решением задач неоднородной анизотропной упругости, выполненных с использованием метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS, для композитных пластин с криволинейным армированием, а также сравнением численных и экспериментальных результатов.

Практическая значимость работы. Разработана методика проектирования композитных материалов с криволинейным армированием с учетом распределения траекторий волокон. Показаны преимущества применения таких композитных структур не только в теории, но и в эксперименте. Использование разработанного метода позволяет смоделировать непрерывные траектории волокон, по которым возможно осуществить изготовление композитов посредством 3D печать, что и было продемонстрировано в настоящей работе.

Апробация результатов работы была проведена на отечественных и международных семинарах, съездах и конференциях:

- 1) Международных инновационных конференциях молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения «МИКМУС» (Россия, Москва, 2009 – 2013 и 2018 – 2021 гг.);
- 2) Московских ежемесячных семинарах молодых ученых и студентов (МЕСМУС) по проблемам машиноведения имени Ю.Н. Работнова (Россия, Москва, 2011, 2014 и 2017 – 2019 гг.);
- 3) Конференции «Наследственная механика деформирования и разрушения твердых тел – научное наследие Ю.Н. Работнова» (Россия, Москва, 2014 г.);
- 4) The 16th European Conference on Composite Materials (ECCM16) (Испания, Севилья, 2014 г.);

5) X и XI Всероссийских съездах по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Россия, Нижний Новгород, 2011 г. и Россия, Казань, 2015 г.);

6) Всероссийской молодёжной научно-практической конференции «Орбита молодёжи» и перспективы развития российской космонавтики» (Россия, Самара, 2016 г.);

7) XII международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Россия, Екатеринбург, 2018 г.);

8) 26th Annual International Conference on Composites/Nano Engineering (ICCE-26) (Франция, Париж, 2018 г.);

9) II Международной онлайн-конференции «Композитные материалы и конструкции» (Россия, Москва, 2021 г.).

Результаты работы опубликованы в 15 научных работах, из которых 13 и 2 – публикации в журналах, индексируемым Scopus и входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК РФ, соответственно.

Объём и структура диссертации включают в себя 132 страницы основного текста, введения, пяти глав, заключения и списка литературы (151 источник).

Во введении дается общая характеристика диссертационной работы, описывается актуальность научной работы, цели и задачи исследования, научная новизна, степень разработанности проблемы, теоретическая и практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту, а также описывается краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе диссертации приводится обзор известных методов моделирования и оптимизации композитных материалов с криволинейной структурой армирования, переменная жесткость которых может достигаться за счет изменения ориентации волокон, толщины пластины и объемной доли волокон. Помимо этого, рассматриваются различные способы изготовления, позволяющие реализовать такие неоднородные композитные структуры.

Во второй главе представлены методы теории анизотропной упругости, позволяющие описать взаимосвязь между направлением, объемной долей волокон и свойствами композитного материала. Рассматриваются разнообразные критерии прочности композитов, один из которых, а именно критерий Хашина, применяется в работе для определения начала разрушения композитов.

В третьей главе приводится метод построения криволинейных траекторий волокон, ориентация которых совпадает с направлением максимальных главных напряжений. На основе полученных траекторий осуществляется моделирование композитного материала с учетом их расположения, включая изменения как направления волокон, так и расстояния между ними. Представлен метод деградации свойств материала, позволяющий моделировать накопление повреждений при росте нагрузки и рассчитывать предельную нагрузку для композитных конструкций.

В четвертой главе приводится анализ влияния неоднородной структуры армирования на механическое поведение композитных пластин. Дается сравнение полей напряжений при переходе от однонаправленного армирования к криволинейному и показывается целесообразность такого перехода.

Для моделирования прогрессирующего разрушения пластин как с однонаправленным армированием, так и с криволинейным применяется метод деградации свойств материала. Демонстрируется, что нагрузка, при которой начинается разрушение матрицы и волокна, возрастает при переходе от однонаправленного армирования к криволинейному. Кроме того, при изменении армирования на криволинейное наблюдается увеличение несущей способности пластин (максимальной нагрузки).

В пятой главе описываются методы 3D печати композитных пластин, в которых возможно реализовать различные структуры армирования. Показываются преимущества перехода для композитных пластин с однонаправленного армирования на криволинейное.

В заключении обобщены основные выводы и результаты диссертационной работы.

Диссертация и автореферат изложены на хорошем научно-техническом языке и доступной для понимания форме. Автореферат имеет четкую структуру и достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

По диссертации и автореферату имеется ряд замечаний:

- 1) В работе не проводилось исследование по критерию представительности объема для конечного элемента. В этой связи не ясно, достаточно ли в минимальном конечном элементе волокон для корректности усреднения.
- 2) Необходимо пояснить и обосновать используемую в работе модель взаимодействия болта и окружающего болт композиционного материала.
- 3) При моделировании криволинейных траекторий волокон не указывается было ли выполнено условие непрерывности количества волокон «сколько вошло – столько вышло». Каким образом обеспечивается выполнение этого условия при произвольном назначении и изменении расстояния между волокнами?
- 4) Следует пояснить используемую в работе модель деградации свойств материала. Накопления рассеянных повреждений в деформируемых твердых телах сводится к зарождению, развитию и объединению микродефектов. Этот процесс описывается, как правило, путем введения параметра повреждаемости и формулировке эволюционного уравнения для этого параметра. В данной работе вместо этого вводятся коэффициенты деградации, свои для каждого упругого модуля. Необходимо разъяснить, как работает эта модель?

- 5) В приведенной в тексте диссертации таблице 3.2 для разрушения матрицы рассматривается только случаи разрушения при растяжении и сжатии. Почему не рассматривается часто реализуемый вариант разрушения матрицы при сдвиге?
- 6) Литературный обзор можно было бы дополнить, упомянув в работе результаты В.В. Васильева, внесшего вклад в развитие методов моделирования композитных материалов с криволинейным армированием.

Заключение

Сделанные замечания не снижают теоретическую и практическую значимость полученных результатов. Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук пунктами 9-14 Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842 «О порядке присуждения ученых степеней» (с изменениями и дополнениями). Автор диссертации Малахов Андрей Викторович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела».

Диссертация заслушана и обсуждена на научном семинаре Отдела Механики адаптивных и композиционных материалов и систем ИПРИМ РАН. Отзыв утвержден на заседании Ученого совета Института прикладной механики Российской академии наук, протокол № 3 от 16.04.2024.

Отзыв составил:

Главный научный сотрудник ИПРИМ РАН

д.ф.-м.н., проф. Мовчан Мовчан Андрей Александрович

Контактные данные организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной механики Российской академии наук.

Адрес: 125040, Россия, Москва, Ленинградский проспект, д. 7, стр. 1.

Телефон: +7 (495) 946-18-06

E-mail: iam@iam.ras.ru

Официальный сайт: <https://iam.ras.ru/>

Ученый секретарь
ИПРИМ РАН, к.ф.-м.н.



Карнет Юлия Николаевна

С отзывом ознакомлен

26.04.2024 Моу