

На правах рукописи



Малахов Андрей Викторович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С
НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ АРМИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ
КРИВОЛИНЕЙНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ВОЛОКОН**

1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН).

Научный руководитель: **Полилов Александр Николаевич,**
Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории безопасности и прочности композитных конструкций ИМАШ РАН, г. Москва.

Официальные оппоненты: **Горбачев Владимир Иванович,**
Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика композитов» механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва.

Сапожников Сергей Борисович,
Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры «Техническая механика» Политехнического института Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва.

Защита диссертации состоится «05» июня 2024 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.07 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО МАИ (НИУ) и на сайте https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=178239

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета, к.т.н., доцент



Сердюк Дмитрий Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Полимерные композитные материалы (ПКМ), армированные непрерывными волокнами, широко и эффективно используются в различных отраслях промышленности благодаря своим высоким удельным характеристикам. Однако, поскольку жёсткость и прочность волокон значительно выше, чем у матрицы, для эффективного применения композитов волокна ориентируют в направлении наибольших напряжений. Для композитных конструктивных элементов со стандартной многослойной структурой, в которых поля напряжений однородны, такой подход является наиболее подходящим, так как каждый слой с однонаправленными волокнами можно направить в соответствии с действующими напряжениями. Таким образом, удастся оптимально перераспределить нагрузку по слоям внутри композитной структуры и обеспечить её высокую эффективность.

Совершенно по-другому приходится укладывать волокна в композитных конструкциях с концентраторами напряжений, в которых возникают неоднородные поля напряжений. Чтобы добиться высокой эффективности ПКМ, из-за градиентных полей напряжений уже недостаточно просто ориентировать слои с прямолинейными, однонаправленными волокнами вдоль наибольших напряжений, поскольку возле концентраторов неизбежно возникает всплеск напряжений, и сами поля напряжений в общем случае существенно неоднородны.

В этой связи предлагается принципиально иной подход к проектированию композитных материалов-конструкций, в которых криволинейные волокна будут укладываться по траекториям, согласованным с полем напряжений. Адаптация криволинейных волокон к неоднородным полям напряжений приведёт к значительному повышению эффективности ПКМ за счёт лучшего использования специальной структуры армирования композитов.

В Природе в ходе эволюции живых организмов были выработаны различные механизмы адаптации к окружающей среде, позволяющие эффективно применять биологические материалы. Эти механизмы включают в себя самосборку, самолечение, самодиагностику, гидратацию, адаптацию несущих структур к внешним нагрузкам и другие механизмы, которые недоступны для искусственных однородных и квазиоднородных материалов. Кроме того, природные материалы синтезируются только из ограниченного набора компонентов при температуре окружающей среды ~ 20 °С и низком давлении ~ 0.1 МПа (1 атм). Но при этом возникают уникальные, сложные материалы с различными свойствами на разных масштабах структуры (нано-, микро- и макроуровень), что обеспечивает высокую экономию природных ресурсов. Для достижения многофункциональных свойств природных материалов могут быть использованы разнообразные структуры армирования (волокнистые, градиентные, ячеистые, трубчатые, слоистые и другие).

Одна из таких композитных структур, адаптированная к внешним нагрузкам, широко реализована в Природе, и в ней криволинейные волокна в окрестности концентратора согласуются с неоднородными полями напряжений. Этот механизм увеличения прочности природных структур можно наблюдать в древесине, а именно, в стволе дерева возле сучка. Данный механизм мог бы быть использован и в искусственных композитных материалах, в которых локальная жёсткость изменялась бы благодаря переменным ориентациям волокон и их объёмной доли, в зависимости от действующих полей напряжений.

Исходя из вышеизложенных соображений, актуальным представляется поиск и разработка качественно нового метода проектирования композитных структур с криволинейным армированием, позволяющим максимально реализовать потенциал ПКМ, а также использовать при моделировании и изготовлении перспективных материалов-конструкций непрерывные и криволинейно уложенные волокна.

Цель и задачи исследования. Цель работы состоит в том, чтобы разработать такой метод проектирования композитных структур, который позволил бы обеспечить эффективный переход от стандартного прямолинейного (однонаправленного) армирования к криволинейному, адаптируя непрерывные траектории волокон, как к геометрии конструкции, так и к действующим полям напряжений.

В соответствии с поставленной целью основными задачами работы являются:

1. Разработка метода построения рациональных, криволинейных траекторий волокон;
2. Разработка метода моделирования неоднородного композитного материала с учётом криволинейных траекторий волокон;
3. Анализ полей напряжений в композитных пластинах, имеющих смоделированную, криволинейную структуру армирования;
4. Разработка метода моделирования прогрессирующего разрушения, учитывающего локальную неоднородность свойств материала, для анализа прочности композитных пластин с различным армированием.
5. Применение современных аддитивных технологий для создания опытных образцов и проведение экспериментов по определению несущей способности композитных структур с криволинейным армированием, а также сравнение их со стандартными прямолинейными структурами.

Объект исследования. Объектом исследования являются композитные пластины с различными концентраторами напряжений, в которых в схеме армирования присутствуют как прямолинейные, однонаправленные, так и криволинейные волокна.

Методы исследования. В работе использовался метод конечных элементов (МКЭ), с помощью которого описывалась неоднородная композитная структура с криволинейным

армированием, а также моделировалось прогрессирующее разрушение. Моделирование и анализ полученных структур проводился в программном комплексе ANSYS, для чего потребовалось написать нестандартные алгоритмы на языке программирования APDL (ANSYS Parametric Design Language). Для изготовления композитных образцов с различным армированием были использованы следующие 3D принтеры, выполненные по технологии FDM (Fused Deposition Modeling [технология послойного наплавления]): COMBOT-I и Bonsai Lab, а испытания пластин на растяжение были проведены на сертифицированной электрогидравлической машине Shimadzu с контроллером 4830, позволяющей достигать максимальной нагрузки в 50 кН.

Степень разработанности проблемы. Исследования в области механики деформируемого твердого тела, посвященные моделированию и оптимизации композитных материалов с криволинейным армированием, были опубликованы в научных работах ряда отечественных и зарубежных авторов (Б.Д. Аннин, Н.В. Баничук, А.А. Барсук, Г.И. Брызгалин, С.А. Лурье, Ю.В. Немировский, А.А. Сафонов, А.Н. Федоренко, Б.Н. Федулов, М.М. Abdalla, J.H.S. Almeida Jr., I.A. Ashcroft, R.F. Charette, H. Cho, A. Crosky, E. Demir, A.N. Dickson, D.P. Dowling, G. Duvaut, R.T.L. Ferreira, R.R. Fernandes, Z. Gürdal, R.T. Haftka, S. Honda, M.W. Hyer, K. Katagiri, D.W. Kelly, S. Khan, H. Li, N. Li, R. Matsuzaki, V.S. Papadimitriou, L. Parnas, P. Pedersen, R. Rowlands, S. Setoodeh, T. Shafiqhfarid, A. Spickenheuer, X. Tian, M.W. Tosh, T. Wang, Y. Yamanaka, D. Yang, H. Zhang, S. Zhao, Y. Zhu и другие). Стоит отметить, что в качестве основного метода в известных исследованиях использовалось только варьирование ориентации волокон при моделировании материала с неоднородной структурой армирования, и крайне мало работ, в которых учитывалось бы влияние, как ориентации волокон, так и расстояния между их траекториями.

Информационная база исследования. В качестве информационной базы диссертационной работы использованы отечественные и зарубежные научные монографии и статьи.

Научная новизна диссертации состоит в том, что:

1. Разработан новый метод построения криволинейных траекторий волокон, ориентированных вдоль направлений максимальных главных напряжений.
2. Разработана новая методика моделирования композитных структур с криволинейным армированием, позволяющая учитывать как направление волокон, так и изменение расстояния между ними.
3. Впервые проведён численный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) в новых композитных структурах с криволинейными волокнами и с неоднородными свойствами.
4. Впервые метод деградации свойств материала применён для моделирования прогрессирующего разрушения композитов с неоднородной криволинейной структурой

армирования. На основе метода деградации свойств выполнен анализ накопления повреждений в композитных пластинах с различными структурами армирования.

5. Проведены первые испытания на растяжение композитных пластин с разными концентраторами напряжений, армированных специально уложенными криволинейными волокнами. Исследованные пластины были изготовлены по недавно разработанной технологии 3D печати при международной кооперации с научными группами из Китая и Японии.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность результатов обеспечивается строгим решением задач неоднородной анизотропной упругости (с помощью МКЭ в программном комплексе ANSYS) для пластин из композитных материалов, а также сравнением теоретических, численных и экспериментальных результатов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Научная гипотеза о существенном повышении несущей способности композитных конструкций за счёт изменения структуры армирования, а именно, перехода от однонаправленных волокон к криволинейным.
2. Методика моделирования композитных пластин с неоднородными свойствами на основе криволинейных траекторий укладки волокон.
3. Метод моделирования прогрессирующего разрушения применительно к композитным пластинам с криволинейным армированием.
4. Результаты расчётов прочности различных композитных пластин, в которых моделировалось как однонаправленное, так и криволинейное армирование.
5. Экспериментальные результаты по прочности композитных пластин, напечатанных на 3D принтере и имеющих разные криволинейные структуры армирования.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработана методика моделирования композитных неоднородных структур с криволинейной системой армирования. Показаны преимущества применения таких структур по сравнению со стандартными прямолинейными структурами армирования. Использование разработанной методики проектирования в конструкциях из ПКМ позволит существенно повысить их эффективность. Применение непрерывных траекторий волокон при моделировании композитных пластин с криволинейным армированием позволяет изготавливать их по существующим технологиям. Один из таких перспективных способов производства посредством технологии 3D печати продемонстрирован в настоящей работе.

Значимость данной работы подтверждается вниманием к ней со стороны отечественного и мирового научного сообщества, поскольку устные доклады по этой теме были приняты на различных семинарах, конференциях и съездах, а статьи по материалам этого исследования были

опубликованы в ведущих научных рецензируемых журналах. Помимо этого, исследования по представленной работе были поддержаны грантами РФФИ:

1. №12-08-31323 мол_а «Экспериментально-расчетное исследование механических свойств биокompозитов с криволинейной анизотропией»;
2. №15-08-01472 А «Технологическая структурная биомеханика композитных материалов с криволинейными траекториями волокон»;
3. №18-08-00372 А «Новые фундаментальные подходы к проектированию узлов крепления и к оценке опасности дефектов в композитных конструкциях»;
4. №18-58-53020 ГФЕН_а «Функционально адаптированное проектирование и изготовление композитов, армированных непрерывными волокнами, с помощью трехмерной печати».

В одном из них Малахов А.В. был руководителем проекта (№12-08-31323 мол_а), а в остальных – ответственным исполнителем.

Апробация результатов. Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих отечественных и международных семинарах, съездах и конференциях:

- на международных инновационных конференциях молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения «МИКМУС» (Россия, Москва, 2009 – 2013 и 2018 – 2021 гг.);
- на Московских ежемесячных семинарах молодых ученых и студентов (МЕСМУС) по проблемам машиноведения имени Ю.Н. Работнова (Россия, Москва, 2011, 2014 и 2017 – 2019 гг.);
- на конференции «Наследственная механика деформирования и разрушения твердых тел – научное наследие Ю.Н. Работнова» (Россия, Москва, 2014 г.);
- на The 16th European Conference on Composite Materials (ECCM16) (Испания, Севилья, 2014 г.);
- на X и XI Всероссийских съездах по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Россия, Нижний Новгород, 2011 г. и Россия, Казань, 2015 г.);
- на Всероссийской молодёжной научно-практической конференции «Орбита молодёжи» и перспективы развития российской космонавтики» (Россия, Самара, 2016 г.);
- на XII международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Россия, Екатеринбург, 2018 г.);
- на 26th Annual International Conference on Composites/Nano Engineering (ICCE-26) (Франция, Париж, 2018 г.);
- на II Международной онлайн-конференции «Композитные материалы и конструкции» (Россия, Москва, 2021 г.)

Публикации. Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 15 научных работах, из которых 2 [1,2], 12 [1-10,14,15] и 13 [1-10,13-15] - статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, Web of Science и Scopus, соответственно.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, и списка литературы. Общий объём диссертации 132 страницы, в которые входят 14 таблиц и 78 рисунков, а список литературы включает 151 источник.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность научной работы, выполненной в диссертации, а также определяются цели и задачи, объект, методы и научная новизна исследования. Помимо этого, приводится степень достоверности полученных результатов и их апробация, теоретическая и практическая значимость работы, степень разработанности проблемы и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится обзор различных природных композитных материалов, позволяющих за счёт неоднородности их структуры, создавать эффективные конструкции. Основной упор делается на описание способов и методов моделирования, а также оптимизации криволинейных волокон в композитных материалах, в которых локальная переменная жёсткость, в подавляющем большинстве исследований, достигается с помощью варьирования ориентации волокон. Для описания механического поведения материала применяется метод конечных элементов, где в зависимости от выбранного метода моделирования волокнам назначается ориентация. Такой подход был использован в работах Хана (2018 г.), Тоша (2000 г.), Чжана (2018 г., 2022 г.) и Ли (2006 г.), чтобы укладывать волокна вдоль линий тока жидкости, максимальных главных напряжений и траекторий нагрузки. Поскольку данными методами удастся построить непрерывные траектории волокон, полученные криволинейные траектории могут быть использованы для изготовления композитов переменной жёсткости. Однако, оптимизация композитных материалов с криволинейным армированием без учёта непрерывности волокон остается до сих пор самым распространённым методом (Шафифард (2019 г.), Феррейра (2020 г.), Дюво (2000 г.), Баничук (1995 г.) и Чо (2009 г.)), где параметры проектирования оптимизируются независимо друг от друга, поэтому изготовление таких композитных структур не всегда возможно. В дополнение к вышеописанным методам в работах Вана (2021 г.), Сафонова (2019 г.), Алмейда (2019 г.) и Донга (2020 г.) для минимизации веса композитных структур предлагалось применять топологические методы оптимизации, а также гибридные структуры с решетками. Немаловажным аспектом помимо методов проектирования криволинейного армирования в композитных материалах является изготовление таких структур с

контролируемой ориентаций волокон. В данной главе рассматриваются различные способы изготовления композитных материалов с непрерывными и криволинейными волокнами, что достигается разными технологическими средствами. Одним из них является 3D печать, с помощью которой удаётся изготавливать композиты по заданным траекториям. Перемещая сопло 3D принтера по криволинейным траекториям в пределах слоя, становится возможным ориентировать волокна в направлении движения сопла и, тем самым, реализовать криволинейное армирование, а это, в свою очередь, обеспечит переход к новым перспективным неоднородным структурам, адаптированным к градиентным полям напряжений.

Описанный опыт в главе в области проектирования и изготовления даёт представление о современных возможностях создания новых композитных структур, который является основой для диссертационной работы, а различное строение природных материалов показывает перспективные направления дальнейших исследований.

Вторая глава посвящена краткому анализу математического аппарата, необходимого в процессе построения оптимальных структур армирования для описания деформирования и разрушения композитов. Для анализа напряженно-деформированных состояний в композитных материалах приходится использовать определяющие соотношения, устанавливающие связь между тензорами напряжений и деформаций, которые выражаются с помощью закона Гука:

$$\sigma_i = Q_{ij} \cdot \varepsilon_j \quad (1)$$

Здесь $i, j = 1, \dots, 6$, σ_i – компоненты тензора напряжений, Q_{ij} – тензор упругих модулей и ε_i – компоненты матрицы деформаций.

Поскольку в работе моделируются плоские пластины, то закон Гука для ортотропного материала при плоском напряженном состоянии для системы координат (1,2,3), связанной с ориентацией волокон, приобретает следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Однако из-за локального изменения угла ориентации волокна в композитной структуре с криволинейным армированием зачастую локальные оси 1,2,3 не совпадают с глобальной системой координат (x,y,z). В таком случае упругие характеристики композита приходится связывать с глобальной системой координат, для чего требуется их преобразование. Тогда учёт поворота волокон на угол β относительно оси x в зависимости напряжений и деформаций от данного угла при плоском напряжённом состоянии выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [Q'] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где компоненты матрицы жёсткости Q'_{ij} равны ($s = \sin(\beta)$, $c = \cos(\beta)$):

$$\begin{aligned}
Q'_{11} &= Q_{11} \cdot c^4 + 2 \cdot (Q_{12} + 2 \cdot Q_{66}) \cdot s^2 \cdot c^2 + Q_{22} \cdot s^4; \\
Q'_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4 \cdot Q_{66}) \cdot s^2 \cdot c^2 + Q_{12} \cdot (s^4 + c^4); \\
Q'_{22} &= Q_{11} \cdot s^4 + 2 \cdot (Q_{12} + 2 \cdot Q_{66}) \cdot s^2 \cdot c^2 + Q_{22} \cdot c^4; \\
Q'_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2 \cdot Q_{66}) \cdot c^3 \cdot s + (Q_{12} - Q_{22} + 2 \cdot Q_{66}) \cdot s^3 \cdot c; \\
Q'_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2 \cdot Q_{66}) \cdot s^3 \cdot c + (Q_{12} - Q_{22} + 2 \cdot Q_{66}) \cdot c^3 \cdot s; \\
Q'_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2 \cdot Q_{12} - 2 \cdot Q_{66}) \cdot s^2 \cdot c^2 + Q_{66} \cdot (s^4 + c^4).
\end{aligned} \tag{4}$$

Упругие характеристики композитного материала также зависят от объёмной доли волокон и от упругих свойств компонентов. На основании гипотез о равенстве продольных деформаций, поперечных и сдвиговых напряжений в компонентах (в волокнах и в матрице), можно оценить упругие свойства композитного материала по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
E_1 &= E_{1f} \cdot V_f + E_{1m} \cdot (1 - V_f); \\
E_2 &= E_{2f} \cdot E_{2m} / (E_{2m} \cdot V_f + E_{2f} \cdot (1 - V_f)); \\
G_{12} &= G_{12f} \cdot G_{12m} / (G_{12m} \cdot V_f + G_{12f} \cdot (1 - V_f)); \\
\mu_{12} &= \mu_{12f} \cdot V_f + \mu_{12m} \cdot (1 - V_f),
\end{aligned} \tag{5}$$

где E_{1f} , E_{2f} и G_{12f} – модули Юнга и модуль сдвига волокна, E_{1m} , E_{2m} и G_{12m} – модули Юнга и модуль сдвига матрицы, μ_{12f} и μ_{12m} – коэффициенты Пуассона волокна и матрицы, а V_f – объёмная доля волокон.

Разрушение композитов происходит по различным механизмам, которые зависят от вида нагружения, и для определения начала разрушения используются критерии разрушения. В качестве критерия разрушения для моделирования прогрессирующего разрушения композитных структур с различным армированием в данной работе выбран критерий Хашина, так как он достаточно хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными и позволяет определить тип разрушения.

При моделировании прогрессирующего разрушения композитных пластин с различным армированием также предполагается, что такие пределы прочности, как Y_T , Y_C , S_{12} и S_{23} , не изменяются при варьировании объёмной доли волокон, что подтверждается экспериментами. Предел прочности при растяжении в направлении волокон зависит от объёмной доли волокон, и такое поведение учитывается в работе модифицированным правилом смеси.

В **третьей главе** излагается метод моделирования криволинейных траекторий волокон, расположенных вдоль локального направления максимального главного напряжения, а также приводится способ формирования композитной структуры с неоднородными свойствами материала на основе полученных траекторий. Для анализа прочности ПКМ представлен метод деградации свойств материала, позволяющий учитывать неоднородность структуры армирования.

В данном исследовании моделирование композитной структуры с криволинейным армированием осуществляется посредством МКЭ (ANSYS). Двухмерные треугольные и четырехугольные элементы (PLANE182) используются при создании неоднородной

композитной структуры. Все алгоритмы построения траекторий волокон и проектирования композитов переменной жёсткости, а также анализа прогрессирующего разрушения реализуются с помощью языка программирования Ansys Parametric Design Language в программном комплексе ANSYS. Процесс построения композитных структур с криволинейным армированием можно условно разделить на два этапа: подготовительный и итерационный. На подготовительном этапе сначала формируется однородный материал. После моделирования структуры и назначения граничных условий рассчитываем поля напряжений. Далее, зная напряженно-деформированное состояние, строим криволинейные траектории волокон, совпадающие с направлениями максимальных главных напряжений, вдоль которых отсутствуют касательные напряжения. На этом подготовительный этап заканчивается и начинается итерационный процесс. На основе полученных криволинейных траекторий волокон формируется композитная структура переменной жёсткости. Ориентация волокна моделируется локальной системой координат. Каждому элементу структуры назначается своя локальная система координат, которая направлена вдоль максимального главного напряжения. Изменение расстояния между волокнами определяет локальную объёмную долю волокон. Каждому элементу композитной структуры назначается своя объёмная доля волокон, от которой, в свою очередь, зависят механические свойства ортотропного материала. Ориентация волокна и свойства ортотропного материала полагаются постоянными в пределах элемента. Таким образом, в созданной дискретной модели принимается во внимание, как изменение ориентации волокна, так и изменение расстояния между волокнами.

После назначения всем элементам новых механических свойств получается фактически новая структура с соответствующими ей новым полем напряжений и траекториями волокон. Этот итерационный процесс моделирования композитных структур с криволинейным армированием и назначения новых свойств элементам повторяется до тех пор, пока максимальный эффективный коэффициент концентрации напряжений (K'_t), рассчитываемый по формуле (6), изменится между итерациями не более, чем на 1%.

$$K'_t = (\sigma_1 \cdot V_{f0}) / (\sigma_0 \cdot V_f), \quad (6)$$

где σ_1 и V_f – значения напряжения в направлении волокна и объёмной доли волокон в элементе, а σ_0 и V_{f0} – усредненные значения σ_1 и V_f для области, где прикладывается нагрузка.

При проектировании композитов переменной жёсткости строятся криволинейные траектории волокон, согласующиеся с линиями максимальных главных напряжений, вдоль которых отсутствуют касательные напряжения (рис. 1 (а)). В целом, метод построения криволинейной траектории волокна выглядит следующим образом. Зная поле напряжений в элементах, можно в любой точке структуры найти направление под углом β , вдоль которого отсутствуют касательные напряжения (рис. 1 (б)). Выбирая длину отрезка Δ и рассчитывая на

каждом шаге угол β , можно построить ряд последовательных точек, соединением которых можно получить искомую траекторию волокна. Криволинейные траектории волокон представляют собой всего лишь геометрические линии, и они используются только для формирования свойств материала с локально осредненными ортотропными свойствами, которые назначаются элементам и изменяются в зависимости от расположения траекторий волокон. Для расчёта угла β в элементе используется формула (7).

$$\beta = \sum_{n=1}^l (\alpha_{k,n} \cdot s_{k,n}^h) / \sum_{n=1}^l s_{k,n}^h \quad (7)$$

Здесь $\alpha_{k,n}$ – углы в узлах, соответствующие направлению максимальному главному напряжению, $s_{k,n}$ – расстояние от узлов до искомой точки (рис. 1 (б)) в элементе ($h = -1$).

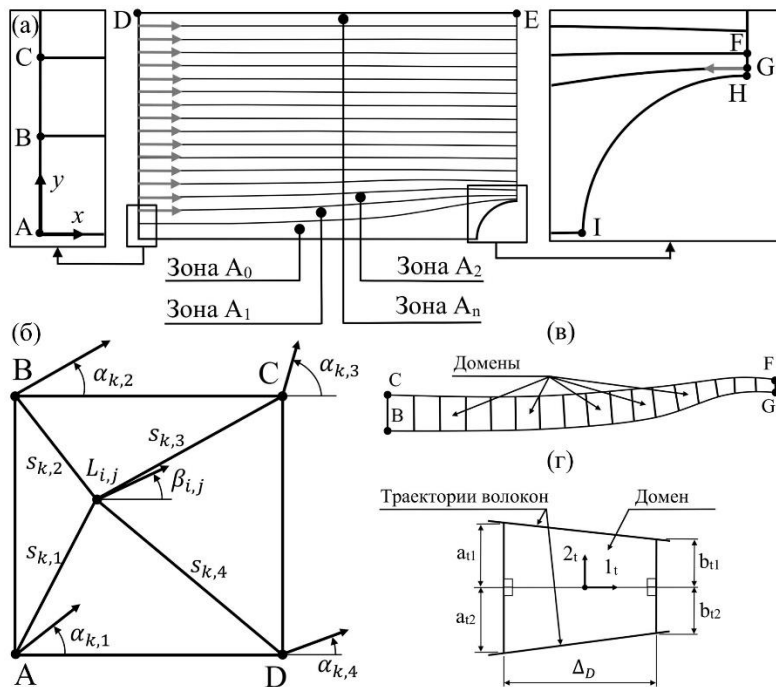


Рис. 1 Общая схема моделирования траекторий волокон для верхней и левой части симметричной пластины, находящейся под действием растягивающей нагрузки - (а), конечный элемент модели - (б), моделирование доменов в зоне - (в) и схема расчёта расстояний между траекториями волокон в домене - (г)

соседними криволинейными траекториями и учесть изменение расстояния между этими траекториями. Созданные таким образом зоны обозначены на рис. 1 (а) как A_1, \dots, A_n . Отметим, что эти зоны моделируются на основе траекторий волокон, поэтому число n зон A_n определяется числом траекторий, используемых для формирования композитных структур переменной

Так как траектории волокон локально совпадают с направлением максимального главного напряжения, необходимо ориентировать волокна в каждом элементе вдоль этого направления. Локальная система координат ($1_k^N - 2_k^N$) назначается k -му элементу композитной структуры, чтобы смоделировать угол ориентации волокна β_k^N , где N – номер итерации. В данном случае ось 1_k^N направлена вдоль максимального главного напряжения, и ориентация волокна моделируемого материала совпадает с ней.

Построенное распределение траекторий волокон используется, чтобы сформировать зоны между

жёсткости. Чтобы рассчитать расстояние между двумя траекториями t -го домена, используются координаты вершин t -го домена вдоль оси Z_t , и это расстояние рассчитывается как $(a_{t1} + a_{t2} + b_{t1} + b_{t2})/2$ (рис. 1 (г)). Максимальная объёмная доля волокон ($V_{fmax} = 57.7\%$) назначается тому домену зоны, в котором расстояние между траекториями волокон наименьшее. Затем объёмная доля волокон в данной зоне уменьшается пропорционально увеличению расстояния между данными траекториями волокон. Для всех других зон уменьшение объёмной доли волокон с ростом расстояний между траекториями вычисляется аналогичным образом. Если центр элемента конечно-элементной модели попадает в пределы домена, то такому элементу назначается объёмная доля волокон этого домена. Таким образом, каждому элементу присваивается своя объёмная доля волокон, зависящая от полученного распределения траекторий волокон.

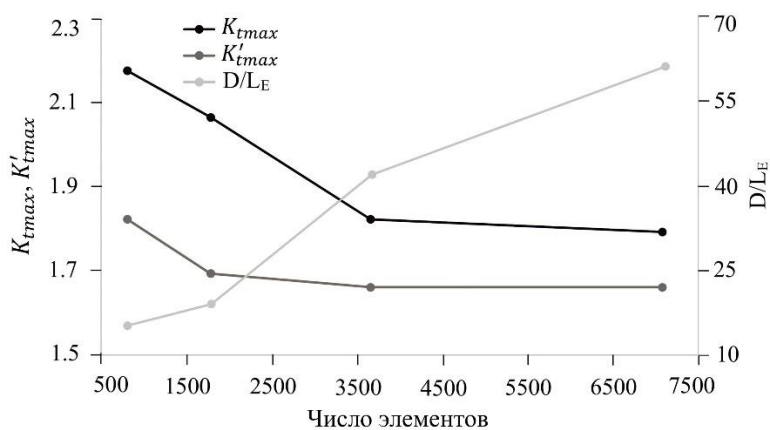


Рис. 2 Зависимости максимальных коэффициентов концентрации от числа элементов

максимальные значения коэффициентов концентрации напряжений при переходе от конечно-элементной сетки с числом элементов 3636 к сетке с числом 7034 изменяются одновременно не более, чем на 2%, что приемлемо для принятия решения о достаточно мелком разбиении. Стоит заметить, что при других размерах пластины число элементов может измениться, поэтому для контроля качества конечно-элементных моделей может использоваться параметр D/L_E , где D – диаметр отверстия, а L_E – длина грани элемента, расположенного в зоне с максимальной концентрацией напряжений. На основе полученных результатов рекомендуется использовать $D/L_E \geq 50$ (рис. 2).

Таблица 1 Изменение упругих свойств пропорционально коэффициентам деградации

| Тип разрушения | Свойства материала при деградации |
|-------------------------------------|--|
| Разрушение матрицы при растяжении | $E'_2 = D_2^T \cdot E_2, G'_{12} = D_4^T \cdot G_{12}$ |
| Разрушение матрицы при сжатии | $E'_2 = D_2^C \cdot E_2, G'_{12} = D_4^C \cdot G_{12}$ |
| Отрыв волокна из матрицы при сдвиге | $G'_{12} = \mu'_{12} = 0$ |

Для анализа влияния конечно-элементных сетей на точность моделирования композитных пластин с отверстием, армированных криволинейными волокнами, и находящихся под действием одноосного растягивающего растяжения, было использовано четыре вида сетей с разным числом элементов. Установлено, что

| | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Разрушение волокна при растяжении | $E'_1 = D_1^T \cdot E_1$ |
| Разрушение волокна при сжатии | $E'_1 = D_1^C \cdot E_1$ |

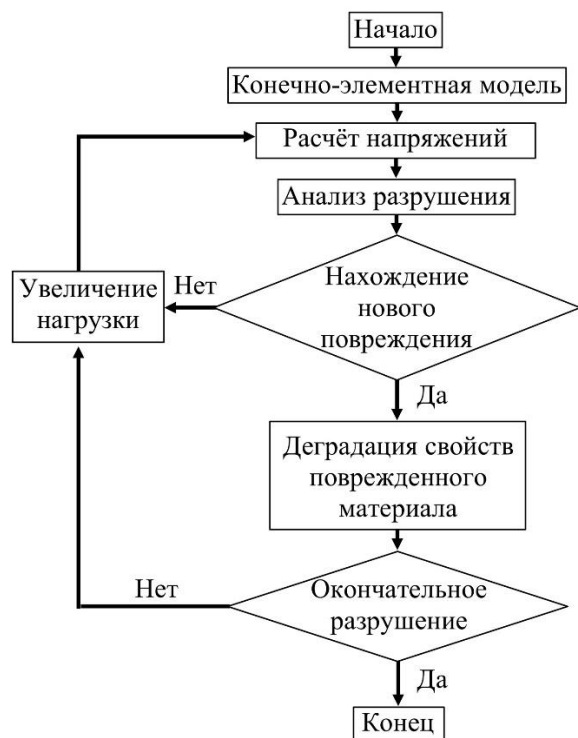


Рис. 3 Общая схема метода деградации свойств материала

Анализ прогрессирующего разрушения для композитных пластин, армированных непрерывными волокнами с однонаправленным или криволинейным расположением, выполнен методом деградации свойств материала (МДСМ). В этом методе предполагается, что с началом разрушения композита его свойства начинают деградировать в зависимости от механизма разрушения. Следовательно, при постепенном увеличении нагрузки (на каждом шаге нагрузки) с целью обнаружения начала разрушения для каждого элемента рассчитывается критерий прочности (в данном случае критерий Хашина). Свойства материала в элементах конечно-элементной модели снижаются, если в них выполняется условие разрушения в соответствии с таблицей 1, а для оставшихся элементов свойства не меняются, если в них не происходит разрушения. Если одно из условий этого критерия разрушения выполняется, то свойства материала деградируют и уменьшаются от значений E_1 , E_2 , G_{12} и μ_{12} до E'_1 , E'_2 , G'_{12} и μ'_{12} . Деградация материала реализуется за счёт коэффициентов деградации (D_1^T , D_1^C , D_2^T , D_2^C , D_4^T и D_4^C), которые зависят от механизма разрушения. Связь свойств материала в первоначальном и деградированном состояниях приведена в таблице 1, где эти коэффициенты были выбраны для моделирования МДСМ: $D_1^T = 0.07$, $D_1^C = 0.14$, $D_2^T = D_4^T = 0.2$, $D_2^C = D_4^C = 0.4$. В соответствии с рекомендациями шаг приращения напряжения между итерациями составлял 10 МПа. После назначения новых свойств материала нагрузка снова увеличивается, и анализ накопления повреждения материала продолжается на каждом следующем уровне нагрузки. Такое прогрессирующее разрушение представляет собой итерационный процесс, и он завершается при нарушении целостности структуры. Общая схема подхода показана на рис. 3.

В четвёртой главе исследуется механическое поведение композитных пластин с разными концентраторами напряжений, армированных как однонаправленными, так и криволинейными волокнами. Проводится анализ влияния переменной жёсткости и непрерывности волокон на несущую способность рассмотренных пластин.

Для оценки эффективности перехода от однонаправленного армирования к криволинейному были рассмотрены симметричные, прямоугольные композитные пластины с отверстием, свободным от напряжений. Размеры этих пластин показаны на рис. 4, где L и W – длина и ширина пластины, соответственно, а D – диаметр отверстия. Отношения W/D для данных пластин варьировались от 1.5 до 6.

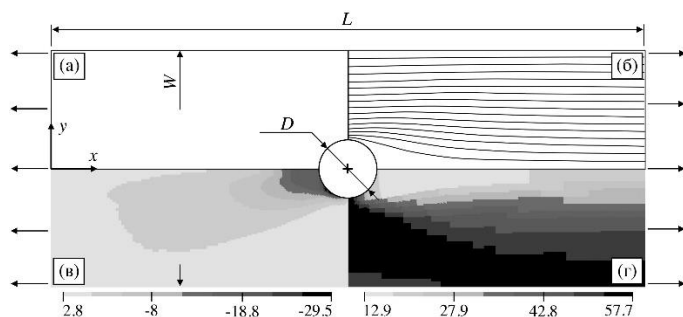


Рис. 4 Размеры - (а), а также распределения траекторий - (б), ориентаций ($^{\circ}$) - (в) и объёмной доли волокон ($\%$) - (г) для пластины с криволинейным армированием ($W/D = 4$)

В качестве материала для рассматриваемых пластин был использован углепластик IM7/8552. После моделирования пластин с криволинейным армированием были получены распределения неоднородных свойств материала. Вычисленные поля распределений траекторий, ориентаций и объёмной доли волокон для образца с $W/D = 4$ показаны на рис. 4 (б), (в) и (г). Для остальных пластин распределения изменений свойств материала оказались схожими.

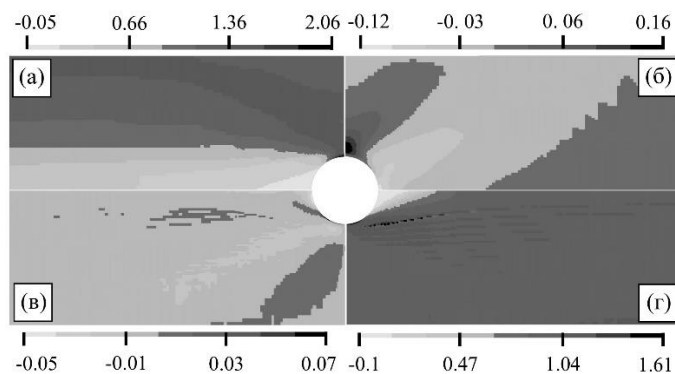


Рис. 5 Напряжение в направлении волокон (МПа) - (а), напряжение поперёк волокон (МПа) - (б), касательное напряжение (МПа) - (в) и эффективный коэффициент концентрации напряжений - (г) для образца с $W/D = 4$

$W/D = 6$ снижение K_t' за счёт изменения армирования составляет 359%.

Значения поперечных и касательных напряжений были вычислены при нагрузке, когда растягивающее напряжение составляло 1 МПа (рис. 5). Напряжения поперёк волокон близки друг другу для пластин с разным армированием, но с одинаковой геометрией пластин, в то время как

Моделирование композитной пластины с криволинейным армированием осуществлялось с помощью ранее описанного метода, а ориентация волокон для однонаправленного армирования выравнивалась вдоль оси x с однородной объёмной долей волокон (57.7%). В качестве материала для рассматриваемых пластин был использован углепластик IM7/8552. После моделирования пластин с

Результаты вычислений показали, что коэффициенты концентрации напряжений снижаются при увеличении отношения ширины пластины к диаметру отверстия, при этом разница между значениями K_t и K_t' также уменьшается для пластин с криволинейным армированием. Эффективный коэффициент концентрации напряжений (в расчёте на волокно) значительно снижается при переходе от однонаправленного армирования к криволинейному. Например, для пластины с

касательные напряжения для пластин с криволинейным армированием всегда меньше, чем для пластин с однонаправленным армированием. Это связано с тем, что в пластинах с криволинейным армированием траектории волокон ориентированы в направлении максимального главного напряжения, и поэтому фактически касательные напряжения минимизируются. Разница значений максимального касательного напряжения особенно заметна между типами образцов с $W/D = 6$, где касательное напряжение снижается в 9 раз за счёт перехода от стандартного прямолинейного армирования к криволинейному.

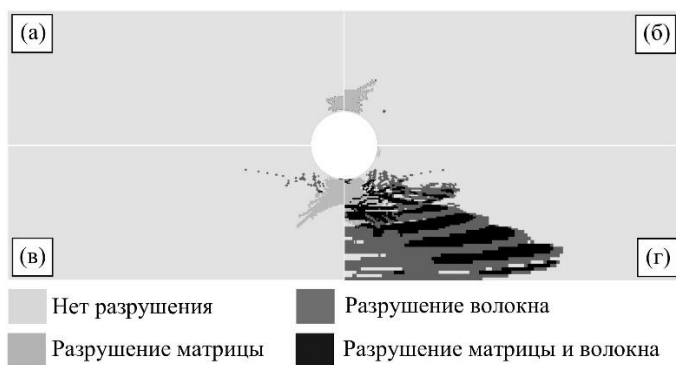


Рис. 6 Распределения разрушений при разном уровне нагрузки (уровне перемещения края образца) для образца с $W/D = 4$: 0.362 мм - (а), 0.598 мм - (б), 0.8 мм - (в), 0.854 мм - (г)

предельная нагрузка (UL) независимо от типа армирования, при этом, PL и UL возрастают в 2.7 и 1.14 раза, соответственно, за счёт изменения армирования при $W/D = 6$.

Для того чтобы оценить одновременное влияние переменной жёсткости и непрерывности волокон, была смоделирована симметричная пластина с отверстием и полукруглыми выточками, на которую действовала растягивающая одноосная нагрузка, направленная вдоль оси x (рис. 7). Так как волокна при однонаправленном армировании ориентированы вдоль оси x , ни одно волокно не остаётся целым от $x = 0$ до $x = 180$ мм из-за наличия концентраторов напряжений.

Результаты расчётов показали, что максимальный коэффициент концентрации напряжений в направлении волокон для однонаправленного армирования равен 10.9, а для криволинейного армирования 6.66, что в 1.64 раза меньше. Значения напряжений поперёк волокон схожи друг с другом при различных типах армирования пластин, в то время как касательные напряжения значительно выше для однонаправленного армирования. Это связано с тем, что в пластине с криволинейным армированием касательные напряжения минимизируются, так как волокна направлены вдоль максимального главного напряжения. Показано, что разрушение матрицы и волокна происходит при нагрузке в 1.98 и 2.96 раз большей для пластины с криволинейным армированием, а предельная нагрузка увеличивается в 1.7 раза при изменении армирования.

Нагрузка, при которой начинается разрушение матрицы и волокна, а также достигается предел пропорциональности, возрастает примерно в 2, 4 и 3 раза, соответственно, при замене однонаправленного армирования на криволинейное. Процесс накопления повреждений для образца с криволинейным армированием и $W/D = 4$ показан на рис. 6. С ростом отношения W/D увеличиваются предел пропорциональности (PL) и

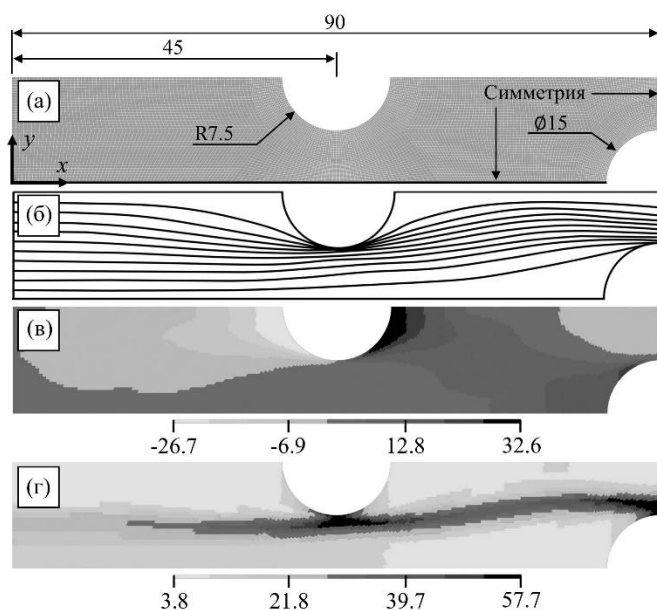


Рис. 7 Конечно-элементная сеть и размеры - (а), а также распределение траекторий волокон - (б), ориентации волокон ($^{\circ}$) - (в) и объёмной доли волокон (%) - (г) для пластины с криволинейным армированием

Для оценки эффективности композитных материалов в зоне крепления были смоделированы симметричные пластины с болтовым соединением, имеющие различные размеры. Поскольку изменение размеров может привести к разным механизмам разрушения, было использовано три типа пластин с отличными друг от друга размерами. При моделировании верхней половины части пластин использовались два типа армирования: однонаправленное и криволинейное.

После завершения итерационного процесса моделирования композитных пластин с криволинейным армированием были получены траектории волокон, которые направлены вдоль максимальных главных

напряжений и на их основе были рассчитаны распределения объёмной доли волокон (рис. 8).

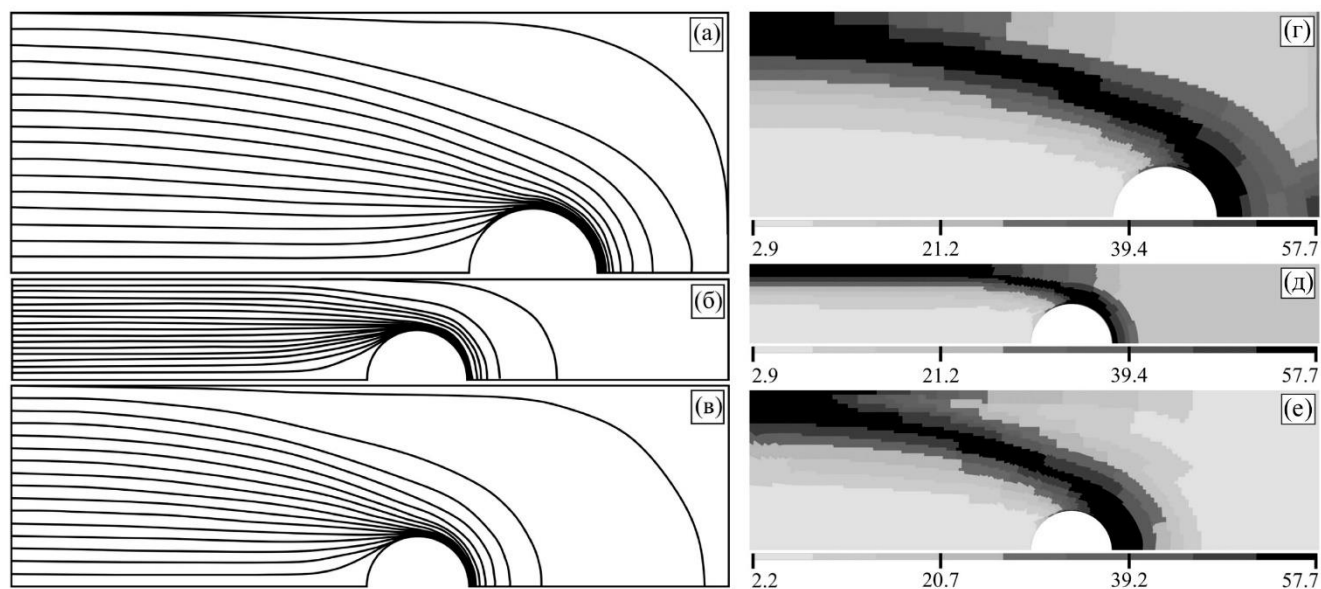


Рис. 8 Траектории волокон - (а), (б) и (в), а также распределения объёмной доли волокон (%) - (г), (д) и (е) для различных композитных структур (результаты показаны только для верхней симметричной половины пластины)

Из результатов расчёта следует, что изменение типа армирования снизило коэффициент концентрации напряжений на 31% от уровня композитных структур с однонаправленным армированием (для геометрии пластины из рис. 8. (в)). Однако наибольшая эффективность за

счёт перехода от однонаправленного армирования к криволинейному наблюдается в эффективных коэффициентах концентрации напряжений, где их снижение в зависимости от геометрии пластины составляет до 74% от их значений для композитов с однонаправленным армированием (для геометрии пластины из рис. 8 (а)).

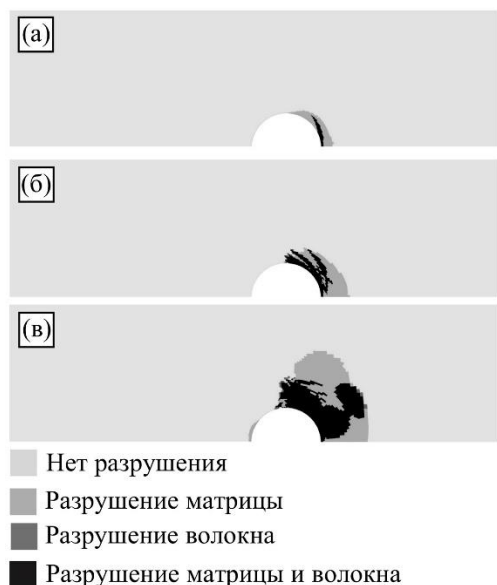


Рис. 9 Поля разрушений при разных уровнях нагрузки (перемещения): $\Delta = 0.59$ мм - (а), $\Delta = 1.67$ мм - (б) и $\Delta = 2.94$ мм - (в) размерами, показанных на рис. 8 (в).

За счёт перехода от однонаправленного армирования к криволинейному удаётся в среднем повысить нагрузку, при которой возникает разрушение матрицы и волокна, соответственно, в 2.4 и 2.3 раза. Предел пропорциональности для пластин с криволинейным армированием также достигается при большей нагрузке, однако, это превышение, в среднем, составляет только 50% от предела пропорциональности пластин с однонаправленным армированием. В отличие от предела пропорциональности предельная (максимальная) нагрузка увеличивается более существенно при изменении структуры армирования, а именно, она возрастает в 4.8, 2.2 и 7.5 раза для композитных структур, показанных на рис. 8 (в), (б) и (а), соответственно. Процесс накопления повреждений при прогрессирующем разрушении для пластин с криволинейным армированием показан на рис. 9.

В пятой главе приводится описание процесса 3D печати, который был использован для изготовления композитных пластин с разными структурами армирования. Представлен анализ исследованных пластин, напечатанных на 3D принтере, а также показаны результаты их испытаний на растяжение.

Расчёт поперечных и касательных напряжений для пластин с однонаправленным армированием показывает, что их значения находятся примерно на одном уровне в отличие от пластины с криволинейным армированием, где доминируют сжимающие поперечные напряжения. Такие высокие значения напряжений поперёк волокон получаются из-за того, что волокна искривляются на 90° вблизи отверстия (рис. 8), а болт давит на них в направлении оси x , то есть поперёк волокон. Для уменьшения поперечных сжимающих напряжений, по всей видимости, целесообразно добавить слой с ориентацией волокон в направлении оси x (вдоль длины пластины). Касательные напряжения существенно снижаются при изменении вида армирования, и их значения уменьшаются в 9.5 раза для пластин с

Для демонстрации эффективности криволинейного армирования композитов была смоделирована, напечатана и испытана пластина с отверстием, к которой прикладывалась одноосная растягивающая нагрузка в направлении оси x (Рис. 10). Для печати композитных пластин с отверстием был использован 3D принтер COMBOT-I, в котором реализована одновременная подача как пучка волокон Кевлара, так и термопластической полимерной нити в экструдер принтера (рис. 11). Композитная нить, напечатанная на 3D принтере, может иметь переменную ориентацию и объёмную долю волокон, что достигается за счёт контроля позиционирования сопла, а также изменения скорости подачи термопластической полимерной нити. Таким образом, имеется возможность печатать криволинейную композитную нить с переменной шириной и контролируемой ориентацией волокон. На основе разработанного метода моделирования и такого процесса 3D печати была изготовлена пластина переменной жёсткости (рис. 10 (д)).

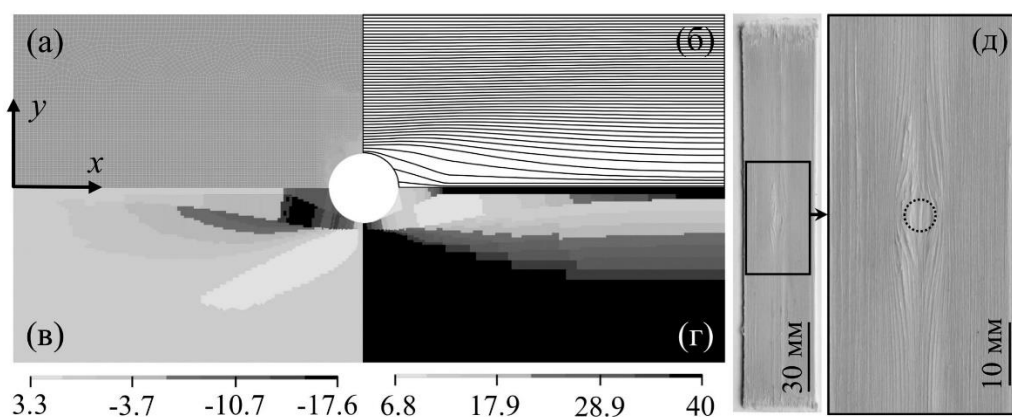


Рис. 10 Конечно-элементная модель - (а), а также распределения траекторий сопла - (б), ориентаций волокна - (в) и объёмной доли волокон - (г). Пластина с криволинейным армированием, напечатанная на 3D принтере - (д)

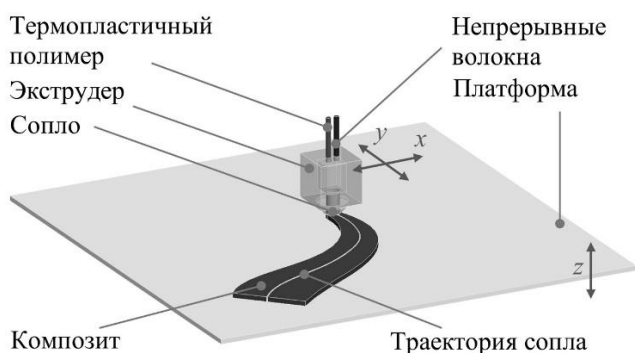


Рис. 11 Процесс 3D печати композитов с криволинейным армированием

Для расчёта пластины с отверстием была создана конечно-элементная модель, которая показана на рис. 10 (а). По завершению моделирования композитной пластины с криволинейным армированием были получены распределения траекторий сопла (рис. 10 (б)), ориентаций волокон (рис. 10 (в)) и объёмной доли волокон (рис. 10 (г)). Были вычислены и использованы значения координат и объёмной доли волокон вдоль траекторий сопла, чтобы контролировать параметры 3D печати. Затем эти данные были переданы по договору в Китай д.т.н., проф. Сяогуану Тяню (Xiaoyong Tian) из Сианьского университета Цзяотун (Xi'an Jiaotong

University) и его коллегам, чтобы они на основе созданного G-кода напечатали композитные пластины (рис. 10 (д)).

После печати образцов были проведены испытания на растяжение с применением корреляции цифровых изображений (в ИМАШ РАН совместно с сотрудниками Татусь Н.А., Плугатарь Т.П. и Пугачёв М.С.) на машине Shimadzu при постоянной скорости движения захватов 0.9 мм/мин. Результаты испытаний показали, что максимальная нагрузка для пластин с криволинейным и однонаправленным армированием составляют 530 МПа и 553 МПа, соответственно. Однако, при практически одинаковой предельной нагрузке усреднённая объёмная доля волокон для пластины переменной жёсткости для неё меньше на 25% по сравнению с однонаправленным армированием. Таким образом, поскольку стоимость волокон Кевлар значительно выше, чем пластика PLA, экономическая эффективность композитных структур с криволинейным армированием существенно возрастает. Кроме того, сравнение численных и экспериментальных полей деформаций, рассчитанных с помощью МКЭ и корреляции цифровых изображений, показывает хорошее согласие друг с другом.

При сотрудничестве с д.т.н., проф. Рёсукэ Мацудзаки (Ryosuke Matsuzaki) из Токийского университета науки (Tokyo University of Science) и с его коллегами была спроектирована, напечатана на 3D принтере и испытана на растяжение пластина с болтовым соединением, состоящая из слоёв с тремя разными типами армирования (рис. 12 (а)). Для изготовления композитных структур с болтовым соединением был использован другой процесс 3D печати, в котором в экструдер подавалась в виде препрега уже полимерная нить, армированная непрерывными углеродными волокнами (рис. 12 (б)). Образцы для испытаний были изготовлены в виде пластины со слоистой структурой $VV_fSC [0/C/\pm 45/C]_s$, состоящей из 10-ти слоёв, где слой С – слой с криволинейными волокнами, направленными вдоль траекторий максимального главного напряжения. Поскольку при использовании непрерывной нити из углепластика с постоянной толщиной и шириной неизбежно возникают пустоты, то для фиксации положения криволинейных волокон в слое С применялись дополнительные слои 0 и $\pm 45^\circ$. Для печати образцов использовался 3D принтер типа FDM (Fused Deposition Modeling (Моделирование методом послойного наплавления)) от Bonsai Lab, Inc. и нить из углепластика от Markforged, Inc.

На рис. 12 (а) показаны траектории волокон для трех типов образцов (VV_fSC , VSC и CSC), использованных во время 3D печати слоёв С и 0. В слое С для образца VV_fSC реализованы криволинейные траектории с переменными ориентацией и объёмной долей волокон, полученные после моделирования композитной пластины переменной жёсткости, а в образце VSC в слое С траектории волокон искривляются только в окрестности отверстия, в то время как волокна в слое 0 в образце CSC являются везде однонаправленными. Эти траектории волокон для всех типов

образцов были преобразованы в G-код и применялись при 3D печати. На рис. 12 (в) показаны фотографии напечатанных слоёв С для образцов VV_fSC и VSC .

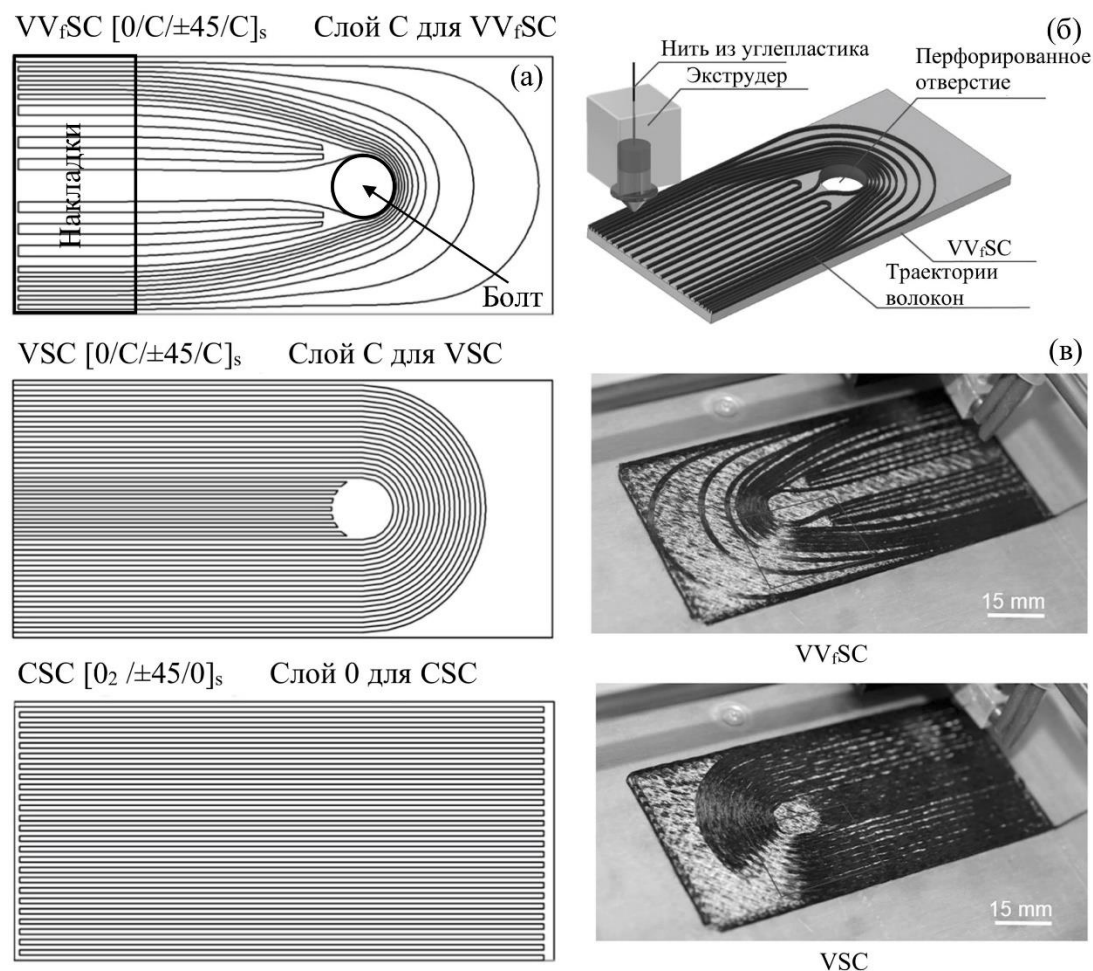


Рис. 12 Траектории волокон в слоях С и 0 - (а), общая схема 3D печати слоя с криволинейным армированием - (б), фотографии слоя С для образцов VV_fSC и VSC - (в)

После проведения испытаний на растяжение оказалось, что максимальная нагрузка примерно одинакова для образцов VV_fSC и VSC и в 1.2 раза выше, чем для образца CSC . Поскольку в образцах VV_fSC и VSC имеются пустоты из-за несплошного заполнения композитным материалом слоя С, то они весят меньше, чем образец CSC . С учетом этой разницы в массе получаем, что на единицу массы максимальная удельная нагрузка для VV_fSC в 1.2 и 1.6 раза выше, чем для образцов VSC и CSC , соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанный метод построения непрерывных траекторий волокон вдоль максимальных главных напряжений позволяет на их основе моделировать неоднородные композитные структуры с криволинейным армированием. Использование МКЭ при моделировании таких структур приведёт к широкому распространению разработанного метода, поскольку отсутствуют

ограничения для применяемого численного метода, что нельзя сказать про аналитические решения, которых порой просто нет из-за сложности задачи.

2. В отличие от многих методов проектирования композитных структур переменной жёсткости в представленном подходе учитывается не только ориентация волокна, но также и изменение расстояния между траекториями волокон. Учёт этого расстояния является принципиально важным, так как жёсткость композитной структуры меняется из-за неоднородности объёмной доли волокон, а это, в свою очередь, влечёт за собой перераспределение свойств материала и, как следствие, изменение рациональных траекторий волокон.

3. Проведённый численный анализ НДС для новых композитных структур с неоднородным криволинейным армированием показывает, что достичь снижения влияния концентрации напряжений можно за счёт изменения структуры армирования, и такой переход от однонаправленного армирования к криволинейному приводит к увеличению эффективности композитных материалов, поскольку возрастает как предел пропорциональности на диаграммах нагружения композитных пластин, так и предельная нагрузка для них.

4. Для оценки эффективности разработанного метода были изготовлены при международной кооперации с научными группами из Китая и Японии опытные композитные образцы с различными структурами армирования. Результаты испытаний подтвердили повышение удельных прочностных характеристик образцов при переходе к криволинейной структуре армирования.

ПЕРЕЧЕНЬ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Малахов, А. В. Построение траекторий волокон, огибающих отверстие, и их сравнение со структурой древесины в зоне сучка / А. В. Малахов, А. Н. Полилов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – № 4. – С. 57–62.

2. Малахов, А. В. Алгоритм построения рациональных траекторий волокон в произвольно нагруженной композитной пластине / А. В. Малахов, А. Н. Полилов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2017. – № 5. – С. 71–80.

3. Malakhov, A. V. Design of composite structures reinforced curvilinear fibres using FEM / A. V. Malakhov, A. N. Polilov // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2016. – Vol. 87. – P. 23–28.

4. Malakhov, A. V. Progressive failure analysis of variable stiffness composite structures / A. V. Malakhov, A. N. Polilov, X. Tian // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2053. – 030038.

5. Sugiyama, K. 3D printing of optimized composites with variable fiber volume fraction and stiffness using continuous fiber / K. Sugiyama, R. Matsuzaki, A. V. Malakhov, A. N. Polilov, M. Ueda, A. Todoroki, Y. Hirano // *Composites Science and Technology*. – 2020. – Vol. 186. – 107905.
6. Hou, Z. A constitutive model for 3D printed continuous fiber reinforced composite structures with variable fiber content / Z. Hou, X. Tian, Z. Zheng, J. Zhang, L. Zhe, D. Li, A. V. Malakhov, A. N. Polilov // *Composites Part B: Engineering*. – 2020. – Vol. 189. – 107893.
7. Malakhov, A. V. A modeling method of continuous fiber paths for additive manufacturing (3D printing) of variable stiffness composite structures / A. V. Malakhov, A. N. Polilov, J. Zhang, Z. Hou, X. Tian // *Applied Composite Materials*. – 2020. – Vol. 27. – P. 185–208.
8. Hou, Z. Design and 3D printing of continuous fiber reinforced heterogeneous composites / Z. Hou, X. Tian, J. Zhang, L. Zhe, Z. Zheng, D. Li, A. V. Malakhov, A. N. Polilov // *Composite Structures*. – 2020. – Vol. 237. – 111945.
9. Malakhov, A. V. Increasing the bearing capacity of composite plates in the zone of bolted joints by using curvilinear trajectories and a variable fiber volume fraction / A. V. Malakhov, A. N. Polilov, D. Li, X. Tian // *Mechanics of Composite Materials*. – 2021. – Vol. 57. – P. 287–300.
10. Hou, Z. Optimization design and 3D printing of curvilinear fiber reinforced variable stiffness composites / Z. Hou, X. Tian, J. Zhang, Z. Zheng, L. Zhe, D. Li, A. V. Malakhov, A. N. Polilov // *Composites Science and Technology*. – 2021. – Vol. 201. – 108502.
11. Malakhov, A. V. Optimization of open-hole variable stiffness composite plates under tensile loading using curved continuous fibers // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1129. – 012019.
12. Tian, X. 3D Printing of Continuous Fiber Reinforced Polymer Composites: Development, Application, and Prospective / X. Tian, A. Todoroki, T. Liu, L. Wu, Z. Hou, M. Ueda, Y. Hirano, R. Matsuzaki, K. Mizukami, K. Iizuka, A. V. Malakhov, A. N. Polilov, D. Li, B. Lu // *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*. – 2022. – Vol. 1. – 100016.
13. Malakhov, A. V. Influence of curved fibers on the mechanical behavior of variable stiffness composites // *Key Engineering Materials*. – 2022. – Vol. 910. – P. 814-819.
14. Huang, Y. Multiscale concurrent design and 3D printing of continuous fiber reinforced thermoplastic composites with optimized fiber trajectory and topological structure / Y. Huang, X. Tian, Z. Zheng, D. Li, A. V. Malakhov, A. N. Polilov // *Composite Structures*. – 2022. – Vol. 285. – 115241.
15. Malakhov, A. V. Three-dimensional printing of biomimetic variable stiffness composites with controlled orientations and volume fraction of fibers / A. V. Malakhov, X. Tian, Z. Zheng, T. P. Plugatar, Y. Huang, N. A. Tatus', D. Li // *Composite Structures*. – 2022. – Vol. 299. – 116091.