

На правах рукописи



СИНИЦЫН АРТЕМ ЮРЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРАНСВЕРСАЛЬНОЙ
ПРОШИВКИ ТОНКОЛИСТОВЫХ СЛОИСТЫХ
ЭПОКСИУГЛЕКОМПОЗИТОВ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ИХ
ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА И МЕЖСЛОЕВУЮ
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ**

Научная специальность

2.6.17. Материаловедение (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре 1103 «Технология композиционных материалов, конструкций и микросистем» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и в научно-исследовательском секторе «Разработки перспективных технологических решений, отработки оборудования и новых материалов» Акционерного Общества «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г.Ромашина».

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор
Бабаевский Петр Гордеевич

Официальные оппоненты: – **Славин Андрей Вячеславович**
доктор технических наук, доцент,
НИЦ «Курчатовский институт – ВИАМ»,
начальник научно-исследовательского
отделения

– **Батраков Владимир Владимирович**
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ», ведущий инженер

Ведущая организация: – ПАО «Объединенная авиастроительная
корпорация» ОКБ «Сухого»

Защита диссертации состоится «10» июля 2025 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 (Д 121.125.15) в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, 3, ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Сковрцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvortsovasv@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте: <https://mai.ru/upload/iblock/462/5md4q22j0fx1snq53v1gghq3jhn19aut/Dissertatsiya-Sinitsyn-veb.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета

Сковрцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время при среднесерийном производстве крупногабаритных тонкостенных элементов конструкций авиационной и ракетно-космической техники наиболее целесообразно применять армированные слоистые эпоксигуглекомполиты (Э-УКМ) на основе углеродных тканей и отверждающихся эпоксидных связующих, формуемых технически простым и экономически эффективным безавтоклавным методом вакуумной инфузии. Однако, несмотря на наличие соответствующих компонентов материалов и разработанной технологии формования, ее применение ведется крайне осторожно. Основной причиной этого служит то, что в получаемых таким способом слоистых Э-УКМ отсутствует армирование в трансверсальном к плоскости укладки слоев ткани направлении, что обуславливает слабую устойчивость к межслоевым статическим и ударным нагрузкам с возникновением повреждений и расслоений при производстве и эксплуатации, сервисном обслуживании и ремонте конструкций.

Разработка простого способа межслоевого армирования слоистых Э-УКМ и повышения устойчивости к межслоевому разрушению прошивкой слоев ткани высокопрочными нитями позволяет решить эту проблему. Однако, к настоящему времени отсутствуют систематические исследования эффективности прошивки формуемых таким способом Э-УКМ. Отсутствует комплексная оценка влияния прошивки на деформационно-прочностные свойства и стойкость к повреждениям Э-УКМ в плоскости армирования, а также на межслоевую трещиностойкость и прочность с учетом технологических параметров формования и прошивки, таких как предварительное натяжение прошивочных нитей, длина стежка его тип и др. Это обуславливает важность и актуальность цели и задач данной работы.

Цель и задачи

Цель диссертационной работы состояла в комплексной оценке влияния усовершенствованной прошивки на деформационно-прочностные свойства в плоскости армирования, межслоевую трещиностойкость и устойчивость к удару тонколистового слоистого Э-УКМ, формуемого по технологии вакуумной

инфузии, с повышением достоверности получаемых данных локализацией оцениваемых характеристик.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Обобщить информацию о компонентах слоистых полимерных углекомполитов (УКМ), применяемых в авиастроении, технологиях их формования, проблемах низкой устойчивости к межслоевым повреждениям и расслоениям и материаловедческо-технологических подходах к ее повышению.

2. Провести анализ существующих схем и технологий трансверсальной машинной прошивки слоистых УКМ, методов и результатов оценки ее влияния на стандартные деформационно-прочностные свойства в плоскости армирования, локальную межслоевую трещиностойкость и прочность в рамках линейной упругой механики разрушения (ЛУМР), устойчивость к повреждениям при внеплоскостном ударе и остаточную прочность после удара.

3. Усовершенствовать процесс машинной прошивки слоев равнопрочной углеродной ткани стеклянной и арамидной нитями в технологии вакуумной инфузии, отформовать по разработанной технологии непрошитые и прошитые пластины слоистого Э-УКМ заданного состава и получить образцы для комплексных испытаний.

4. Определить влияние параметров прошивки на макро- и микроструктурные повреждения слоистого Э-УКМ и степень снижения стандартных деформационно-прочностных свойств при растяжении, сжатии и изгибе в плоскости слоев.

5. Разработать методику и определить показатели межслоевой трещиностойкости прошитого Э-УКМ при нагружении трещины по моде I раскалыванием клином в зависимости от параметров прошивки с локализацией определяемых параметров на элементах (стежках в строчках) прошивки и областях между ними.

6. Разработать методики, определить показатели прочности и работы разрушения при разрыве индивидуальных прошивочных нитей и локальных (ограниченных) зон контакта (отдельных стежков или узлов прошивки и непрошитых участков) между слоями и установить корреляцию этих показателей с локальными параметрами межслоевой трещиностойкости тонколистовых прошитых Э-УКМ, определенными методом расклинивания.

7. Определить влияние параметров прошивки на характеристики повреждений тонколистового слоистого Э-УКМ при локальном внеплоскостном ударе и на остаточную прочность при сжатии после удара, а также установить их корреляцию с локальной межслоевой трещиностойкостью и работой разрушения локальных зон контакта слоев.

Научная новизна

1. Разработана комплексная методология экспериментальной оценки устойчивости прошитых тонколистовых слоистых полимерных композиционных материалов к расслоению сочетанием оригинальных методик расклинивания межслоевой трещины и разрыва локальных зон контакта слоев с определением критических параметров высвобождения упругой энергии при инициировании межслоевой трещины и межслоевой прочности и работы разрушения контактных зон соответственно.

2. Выявлены и оценены эффекты локальности и анизотропии межслоевой трещиностойкости трансверсально прошитых тонколистовых слоистых эпоксигуглекомполитов. Показано, что при прохождении кончиком трещины областей переплетения прошивочных нитей эффективные параметры трещиностойкости более чем в 2 раза выше в сравнении с параметрами, определенными в областях между прошивками после разрушения предыдущих прошивок. Установлено, что значения эффективных локальных параметров трещиностойкости и различия в них зависят от направления распространения трещины вдоль или поперек строчек прошивки и значительно возрастают с увеличением плотности прошивки, т.е. количества стежков, взаимодействующих с кончиком трещины при ее прорастании.

3. Впервые разработана методика и определены прочность и работа разрушения при разрыве локальных зон контакта слоев – отдельных стежков и узлов прошивки и непрошитых участков между слоями прошитых тонколистовых эпоксигуглекомполитов. Установлена корреляция этих показателей с локальными параметрами межслоевой трещиностойкости.

4. Впервые установлено, что после внеплоскостного локального удара с заданной энергией образцов прошитых слоистых углекомполитов, отнесенная к толщине образца, глубина повреждения пропорционально уменьшается, а количество прошивок в области удара и остаточная прочность при сжатии после

удара возрастает с возрастанием плотности прошивки и энергии удара. Выявлена их корреляция с локальной межслоевой трещиностойкостью и энергетическими и силовыми параметрами контактных зон. Показано, что при увеличении удельного локального параметра трещиностойкости в области узла прошивки, умноженного на число прошивок в области удара, от 10 кДж/м² до 30 кДж/м², остаточная прочность после удара увеличивается на 16%, а относительная глубина уменьшается от полного пробития до 58 %.

Теоретическая и практическая значимость

1. На основе макро- и микромеханических представлений линейно упругой механики разрушения о критическом росте трещин разработан метод испытаний устойчивости к расслоению по моде I и проведен анализ получаемых результатов для прошитых тонколистовых слоистых армированных полимерных композиционных материалов с учетом резко выраженной анизотропии армирования в плоскости слоев и трансверсальном направлении.

2. Предложены технические решения по усовершенствованию и оптимизации процесса машинной прошивки пакета слоев углеродной ткани двойным челночным стежком в технологии вакуумной инфузии, с сохранением эффективного армирования в плоскости слоев и проявлением эффекта локального межслоевого (трансверсального) армирования слоистого Э-УКМ, обеспечивающего повышение устойчивости к межслоевым расслоениям.

3. Проведенная комплексная оценка влияния параметров прошивки на структурные повреждения и допустимый уровень снижения стандартных деформационно-прочностных свойств, на локальные параметры межслоевой трещиностойкости, прочности и работы разрыва контакта слоев и их корреляция с устойчивостью к ударным повреждениям тонколистовых эпоксиглекомполитов, формуемых вакуумной инфузией, дает возможность использования полученных данных для более точного прогнозирования влияния прошивки на изменение свойств эпоксиглекомполитов при их применении в составе элементов конструкций авиационной техники и способствует решению проблем использования их в авиастроении.

4. Разработанные технологическая инструкция ТИ 596.25000.1825 «Прошивка и пропитка» по изготовлению изделий из УКМ методом прошивки пакета слоев углеродного наполнителя двойным челночным стежком и пропитке

прошитых преформ методом вакуумной инфузии и методики ПМ 596.1962-2022 «Определение межслоевой трещиностойкости по моде I ПКМ» расслаиванием образцов с предварительно сформированной межслоевой трещиной клином, ПМ 596.1978-2024 «Определения предела локальной прочности при растяжении в направлении толщины образца слоисто-армированных полимерных композиционных материалов» с использованием образцов с выделенной локальной зоной, содержащей отдельные элементы прошивки, внедрены в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина», что подтверждено соответствующим актом.

Методология и методы исследования

Методологической основой проведенных исследований послужили работы ведущих российских и зарубежных ученых и нормативные документы Российской Федерации.

Для решения поставленных задач применены современные методы исследования: методы гидростатического взвешивания и гелиевой пикнометрии, методы оптической микроскопии, компьютерной томографии и сканирующей электронной микроскопии, испытания на растяжение, сжатие, изгиб и остаточную прочность при сжатии после удара, методы определения межслоевой трещиностойкости при нагружении по моде I раскалыванием клином и определения локальной межслоевой прочности разрыва отдельных контактов между слоями.

Положения, выносимые на защиту

1. Способ трансверсального армирования прошивкой двойным челночным стежком слоистых Э-УКМ, с техническими решениями, снижающими эффекты изменения структуры армирующей ткани при выполнении технологических операций и образования дефектов типа «смоляных карманов» в местах прокола ткани после пропитки связующим и его отверждения.

2. Методика определения энергетических показателей межслоевой трещиностойкости тонколистовых прошитых ПКМ при нагружении по моде I, основанная на расслоении образцов типа ДКБ клином и обеспечивающая повышение достоверности за счет локализации показателей на области

прохождения кончиком трещины стежков (ЛО1) и свободных зон (ЛО2) с учетом протекающих при этом микромеханических процессов.

3. Методика определения межслоевой прочности и работы разрушения при отрыве слоев тонколистовых прошитых ПКМ, обеспечивающая повышение достоверности определяемых показателей за счет их локализации по отношению к дискретно-распределенным элементам прошивки и применения образцов с выделенной межслоевой зоной контакта слоев.

4. Результаты экспериментальных исследований по комплексной оценке влияния макро- и микроструктурных повреждений при прошивке на стандартные деформационно-прочностные характеристики тонколистового прошитого Э-УКМ при растяжении, изгибе, сжатии и допустимый уровень их снижения.

5. Результаты экспериментальных исследований локальных параметров межслоевой трещиностойкости и локальной межслоевой прочности отдельных элементов прошитого тонколистового слоистого Э-УКМ и их корреляция между собой и с устойчивостью к внеплоскостному удару.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов работы, сделанных обобщений и выводов обеспечивается достижением четко сформулированной цели и решением поставленных задач, применением классических и современных подходов линейной упругой механики разрушения, современных измерительных приборов, приспособлений и программного обеспечения. Все результаты получены на поверенном оборудовании в испытательной и научно-исследовательской лаборатории по разработке методов и средств определения физико-механических свойств и неразрушающего контроля изделий из полимерных композиционных материалов, аккредитованной межгосударственным авиационным комитетом (№ ИЛ – 142), с использованием современного программного обеспечения. Все испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ.

Апробация результатов

Материалы диссертации доложены на 7 научно-технических конференциях и семинарах, в том числе: Всероссийской научно-технической

конференции «Полимерные композиционные материалы нового поколения для гражданских отраслей промышленности», посвященной 90-летию со дня рождения профессора, д.т.н. Б.В. Перова (Москва, 2020); XVII Международном семинаре «Структурные основы модифицирования материалов МНТ-XVII» (Обнинск, 2023); XXIX Международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. (Москва, 2023); XX Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы разработки и применения бронезащитных и конструкционных композитных материалов» (Республика Дагестан, Каспийск, 2023); 22-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, 2023); VII Всероссийской научно-технической конференции «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения», приуроченной к 40-летию со дня основания Ульяновского научно-технологического центра ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, 2023); XXII международной научно-технической конференции «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» (Обнинск, 2024).

Публикации. Результаты проведенных исследований опубликованы в 10 научных работах, включая 2 патента на изобретение и 2 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК. Список основных публикаций по работе приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка цитируемой литературы и одного приложения. Объем диссертации составляет 158 страниц, включая 91 рисунок, 15 таблиц и список литературы из 130 наименований.

Основное содержание работы

Глава I. Современное состояние вопроса

В главе обобщена информация о компонентах слоистых Э-УКМ, применяемых в авиастроении, и процессах их формования. Показана целесообразность применения таких материалов при среднесерийном производстве крупногабаритных элементов конструкций авиационной и

ракетно-космической техники альтернативным традиционным препреговым технологиям, экономически более эффективным безавтоклавным способом формования – вакуумной инфузией.

Отмечено, что из-за малого внешнего давления при формовании Э-УКМ методом вакуумной инфузии, отсутствия межслоевого армирования и низкой когезионной и адгезионной прочности полимерной матрицы эти материалы и элементы конструкций из них обладают достаточно высокими стандартными деформационно-прочностными свойствами в плоскости армирования, но значительно более низкой межслоевой (в трансверсальном направлении к плоскости армирования) жесткостью и прочностью, и, как следствие, проявляют низкую устойчивость к межслоевым повреждениям и расслоениям при воздействии статических и ударных нагрузок. Проведенный анализ причин низкой устойчивости к межслоевым повреждениям и расслоениям и материаловедческо-технологических подходов к ее повышению показал, что на сегодняшний день наиболее простым и эффективным способом повышения такой устойчивости, является трансверсальная прошивка слоев армирующей ткани (преформов) высокопрочными нитями. При этом прошивка может не только обеспечивать межслоевое армирование слоистых УКМ, но и как альтернатива клеям, фиксировать слои и соединять отдельные элементы преформы в единую целостную структуру на стадии ее формования и использоваться для соединения отдельных составных частей элементов при производстве интегральных конструкций.

Проведен анализ существующих способов трансверсальной машинной прошивки слоистых УКМ, методов и результатов оценки ее влияния на стандартные деформационно-прочностные свойства в плоскости армирования, глобальные и локальные параметры межслоевой трещиностойкости и прочности с использованием макро- и микро-подходов ЛУМР, а также на устойчивость к повреждениям при внеплоскостном ударе и остаточную прочность после удара. Показано, что к настоящему времени в литературе имеется достаточно большое количество разрозненных данных по выявлению зависимости эффективности прошивки слоистых ПКМ, в том числе Э-УКМ различных типов, от структурно-материаловедческих и технологических факторов, специфических для конкретных материалов, технологий их формования, способа, условий и характеристик прошивки. При этом наибольшее внимание уделено оценке

влияния трансверсальной прошивки на жесткость и прочность в плоскости армирования и остаточную прочность при сжатии после локального удара, а также на глобальные параметры межслоевой трещиностойкости методом расслаивания образцов типа ДКБ, стандартным для непрошитых слоистых ПКМ, но обладающим существенными недостатками применительно к сшитым образцам. Однако отсутствуют систематические исследования по комплексной оценке влияния прошивки на локальные параметры межслоевой трещиностойкости, определяемые методом раскалывания клином, и на локальную межслоевую прочность, а также по установлению взаимосвязи этих свойств с устойчивостью к ударным повреждениям и сохранением остаточной прочности применительно к конкретным слоистым Э-УКМ, формируемым безавтоклавным методом вакуумной инфузии.

По результатам анализа этих вопросов определена цель работы и сформулированы задачи исследования.

Глава II. Объекты и методы исследования

Глава II посвящена описанию объектов и методов исследования, включая усовершенствованный процесс прошивки углетканевых преформ и разработанные методики определения локальных параметров межслоевой трещиностойкости и межслоевой прочности тонколистового Э-УКМ.

В качестве объектов исследований в работе использовали непрошито и прошито двумя типами нитей (стеклянной и арамидной) тонколистовые панели из Э-УКМ, изготовленные по безавтоклавной технологии вакуумной инфузии с использованием тканых преформ из слоев равнопрочной углеродной ткани саржевого переплетения, пропитываемых низковязким эпоксидным связующим. Слои углетканевых преформ до пропитки связующим прошивали двойным челночным стежком типа 301 с различным шагом и направлением строчек прошивки на промышленной швейной машине по усовершенствованной методике, используя модифицированную заправку прошивочных нитей, иглу оптимального диаметра и специализированную сборную накладку с обеспечением предельного натяжения прошивочных нитей, предотвращением их пушения и смещения слоев относительно друг друга в процессе прошивки.

При прошивке преформ варьировали тип прошивочной нити и плотность прошивки или обратный ей шаг (расстояние между строчками). Прошивку

осуществляли в направлении вдоль основы армирующей ткани как при однородной укладке (0), так и при чередующейся (45/0).

Кажущуюся плотность, пористость и компонентный состав (соотношение армирующего наполнителя и полимерной матрицы) полученных слоистых Э-УКМ определяли методами гидростатического взвешивания и гелиевой пикнометрии.

Макро- и микроструктурные повреждения прошитых панелей и образцов исследовали с помощью инвертированного оптического микроскопа и стереомикроскопа, а также методом компьютерной томографии.

Определение физико-механических характеристик образцов Э-УКМ проводили на испытательной машине INSTRON 5988, оснащенной оптической системой измерения перемещений VIC 3D с двумя цифровыми камерами с линзами более 5 Мегапикселей.

Деформационно-прочностные свойства при изгибе, растяжении, сжатии и сжатии после удара определяли в соответствии со стандартными методиками по ГОСТ 25.604-82, ГОСТ 25.601-80, ГОСТ 25.602-80 и ASTM D7137 соответственно.

Оценку локальной межслоевой трещиностойкости и прочности Э-УКМ проводили по специально разработанным оригинальным методикам.

Межслоевую трещиностойкость определяли раскалыванием клином плоского образца типа ДКБ с предварительно сформированной в срединной плоскости образца межслоевой трещиной (рис. 1).

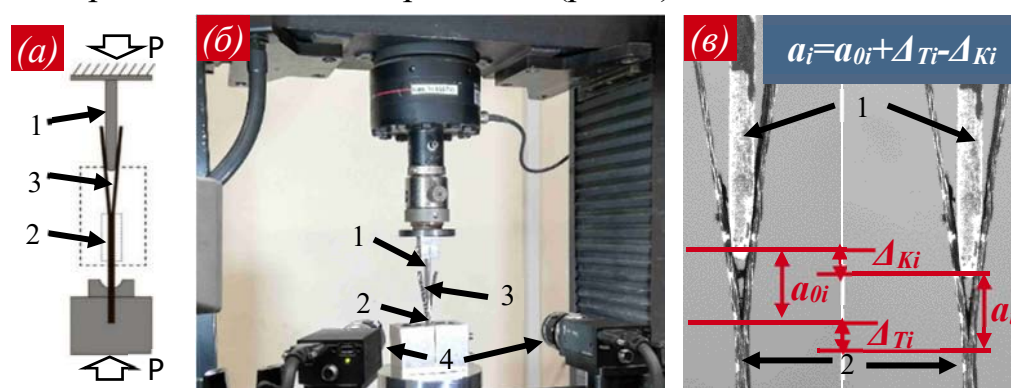


Рис. 1 – Принципиальная схема методики расклинивания (а), фотография испытательного узла (б), и схема определения длины трещины a_i на i -м шаге расклинивания образца (в): (1 – клин; 2 – образец ДКБ; 3 – межслоевая трещина; 4 – камеры оптической системы VIC 3D; a_{0i} – начальная длина трещины перед i -м шагом; ΔK_i и ΔT_i – продвижение клина и смещение фронта трещины соответственно на i -ом шаге)

Методика заключалась в пошаговом (на 0,2 мм) продвижении клина в трещине со скоростью 1 мм/мин, фиксации прикладываемого к клину усилия и определении длины трещины в каждом шаге по величинам смещения клина и кончика трещины по фотографиям, получаемым с помощью оптической системы измерения перемещений VIC 3D (рис. 2 (в)). Критические значения интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины как параметры межслоевой трещиностойкости Э-УКМ рассчитывали локально по раскрытию трещины и ее длине прорастания.

Для оценки локальной межслоевой прочности и работы разрушения индивидуальных прошивок в слоистых Э-УКМ использовали две методики:

– *определение деформационно-прочностных свойств пропитанных эпоксидным связующим индивидуальных прошивочных нитей и их переплетений, имитирующих переплетение при прошивке двойным челночным стежком.*

– *определение локальной межслоевой прочности при отрыве слоев без прошивок и с одним или двумя узлами прошивки (переплетением прошивочной нити в одном или двух проколах иглой в стежке соответственно), используя круглые образцы с выделенной локальной зоной контакта слоев (рис. 2).*

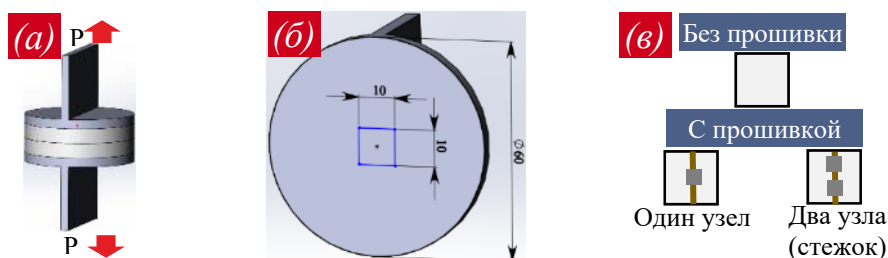


Рис. 2 – Схематические изображения образца для испытания на локальную межслоевую прочность при отрыве (а), формы и размеров зон контакта слоев (б) и их типов (в)

Образцы вырезали из отформованных по обычной технологии непрошитых и прошитых одной строкой вдоль основы армирующей ткани шестислойных пластин так, чтобы локальная зона межслоевого контакта располагалась в центре. В этой зоне в случае прошитых образцов оставляли один или два узла прошивки. При разрыве образцов записывали диаграммы нагрузка-деформация, по которым определяли предельное усилие и рассчитывали удвоенную удельную работу.

Для оценки повреждений при локальном внеплоскостном ударе и определения остаточной прочности при сжатии после удара использовали образцы размером 150x100 мм, с различным шагом прошивки L (от 3 мм до 10 мм) и числом прошивок в образцах N (от 10 до 34). Образцы подвергали удару падающим грузом с энергией от 20 до 40 Дж. Размеры повреждения образцов после удара оценивали по наибольшему диаметру области расслоения, ее глубине и объему. Диаметр расслоения определяли ультразвуковым эхо-импульсным методом с помощью дефектоскопа УД4-Т, а глубину повреждения – с помощью специализированной измерительной установки.

Испытания на сжатие после удара проводили стандартным методом с помощью разрывной машины INSTRON 5988.

Глава III. Влияние межслоевой прошивки на структурные характеристики (повреждения) и стандартные деформационно-прочностные свойства тонкослойных пластин Э-УКМ в плоскости слоев

Глава посвящена комплексному исследованию макро- и микроструктурных характеристик и стандартных деформационно-прочностных свойств в плоскости слоев прошитых тонкослойных пластин Э-УКМ, отформованных по технологии вакуумной инфузии с усовершенствованной трансверсальной прошивкой.

Анализ оптических стерео-микрофотографий поверхностных шлифов прошитых пластин Э-УКМ, примеры которых приведены на рис. 3, позволил выявить локальные повреждения (области смещения и разрушения основных и уточных нитей армирующей ткани вблизи прошивочных узлов и, соответственно, области пустот или избыточного содержания связующего, снижающие эффективность армирования в плоскости слоев).

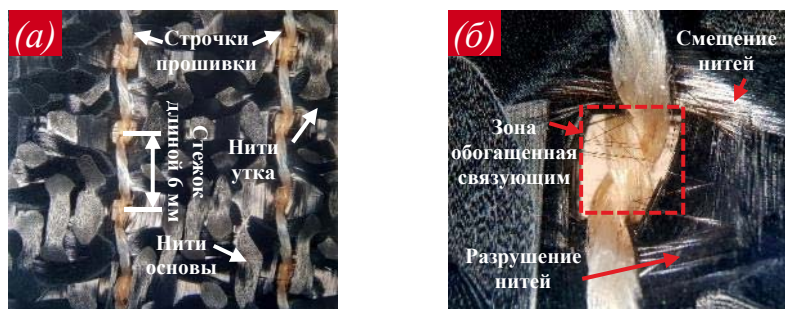


Рис. 3 – Примеры стерео-микрофотографий шлифа поверхности при увеличении 4х (а) и 10х (б) пластины Э-УКМ (шифр 7С[0]₈), прошитой стеклонитью с шагом 7 мм

Вклад этих факторов в изменение прочности и жесткости прошитого Э-УКМ, проявляющихся как при использовании обоих типов прошивочных нитей, так и при различных направлениях приложения нагрузки относительно строчек прошивки, в решающей степени определяется шагом прошивки, обратным ее плотности: чем меньше шаг прошивки, тем больше этот эффект, что особенно резко выражено при испытании на растяжение (рис. 4).

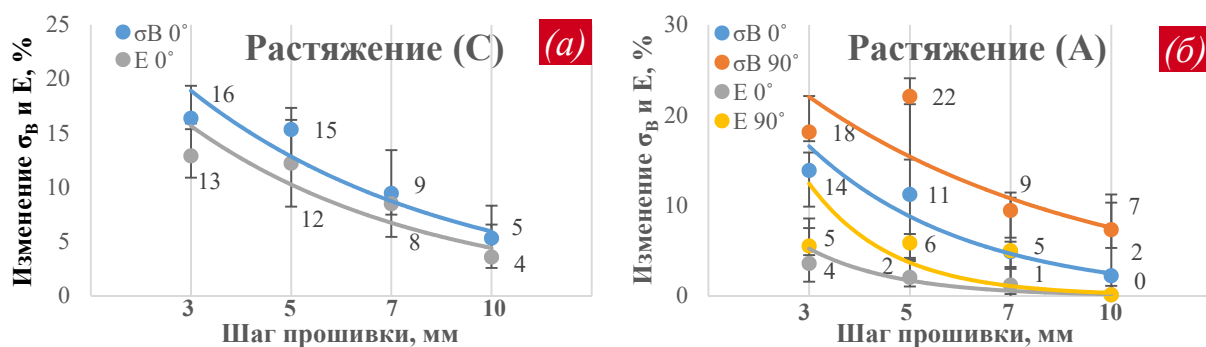


Рис. 4 – Графики зависимостей от шага прошивки усредненных изменений (в %), по сравнению с непрошитыми образцами, разрушающего напряжения (σ_B) и модуля упругости (E) при растяжении образцов Э-УКМ, прошитого стеклянной (a) и арамидной (б) нитями, с приложением нагрузки в продольном (0°) и поперечном (90°) направлениях относительно строчек прошивки

Результаты систематических исследований влияния этих эффектов на стандартные деформационно-прочностные свойства в плоскости слоев прошитых тонких пластин Э-УКМ при растяжении, сжатии и изгибе показывают, что уменьшение шага прошивки, при прочих разных условиях, играет определяющую роль в снижении этих свойств по сравнению с непрошитыми пластинами. При шаге прошивки в интервале 5-7 мм уменьшение стандартных значений модулей упругости и пределов прочности в плоскости слоев в среднем составляет порядка 10 %, что соответствует результатам, имеющимся в литературе для других типов слоистых ПКМ и технологий их прошивки и формования. При этом установлено, что значения предела прочности и модуля упругости образцов с прошивкой арамидной и стеклянной нитями при обоих углах приложения нагрузки слабо коррелируют с долей «смоляных карманов». Вероятнее всего это обусловлено тем, что, помимо непосредственного эффекта «смоляных карманов», уменьшение деформационно-прочностных свойств в плоскости армирования при прошивке слоистого Э-УКМ определяется повреждениями армирующей ткани при их формовании, в первую очередь, локальными смещениями (искривлениями) и

разрывами волокон. С другой стороны, с увеличением плотности прошивки увеличивается количество несущих нагрузку прошивочных нитей в трансверсальном направлении, т.е. проявляется эффект дополнительного армирования, частично компенсирующий эффекты от повреждений армирующей ткани.

Глава IV. Влияние прошивки на устойчивость к межслоевому разрушению тонколистового УКМ и корреляция между межслоевой трещиностойкостью и локальной прочностью

В данной главе проведен анализ и обобщение результатов систематических исследований влияния типа прошивочной нити, плотности прошивки и направления действующей нагрузки относительно укладки слоев и строчек прошивки на устойчивость к межслоевому разрушению тонколистовых пластин Э-УКМ. В качестве характеристик такой устойчивости использовали локальные параметры межслоевой трещиностойкости при расклинивании стандартных образцов типа ДКБ с заданной трещиной, а также параметры прочности при разрыве индивидуальных прошивочных нитей, их переплетений и локальных межслоевых контактов Э-УКМ.

Исследования межслоевой трещиностойкости тонколистовых пластин Э-УКМ проводили по описанной в главе II методике расклинивания, сопоставляя наблюдаемые значения прилагаемого на клин усилия и ступенчатого перемещения кончика трещины (рис. 5).

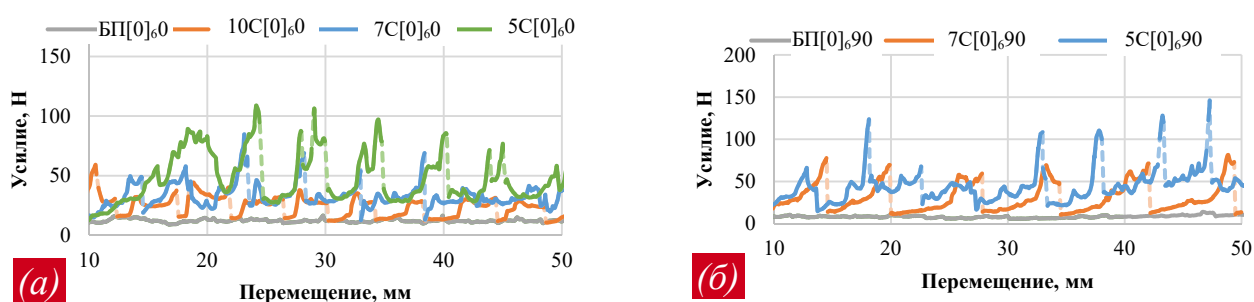


Рис. 5 – Примеры графиков усилие-перемещение клина при расклинивании непрошитых и прошитых стеклонитью образцов тонкослойного Э-УКМ при распространении трещины параллельно (а) и перпендикулярно (б) строчкам прошивки («БП[0]₀/90» – без прошивки параллельно (0) и перпендикулярно (90) основе ткани соответственно; «10-5C[0]₀/90» - прошитые стеклонитью с шагом 10, 7 и 5 мм, параллельно (0) и перпендикулярно (90) основе ткани и строчкам прошивки соответственно)

Как видно из приведенных примеров кривых, при расклинивании непрошитых образцов «БП[0]₆₀» и «БП[0]₆₉₀» усилие, необходимое для перемещения клина, практически не зависит от направления укладки слоев ткани и варьируется случайным образом в сравнительно небольшом интервале средних значений (менее 10 Н). В случае прошитых образцов на всех графиках наблюдается значительно большее и четко выраженное периодическое изменение усилия, минимальные и максимальные уровни которого (от 10 до 100 Н и выше) четко коррелируют с местом прохождения трещины: максимальные пики наблюдаются при прохождении трещиной области переплетения прошивочных нитей в стежке с их деформированием и разрывом (локальная область ЛО1), а минимальные – при ее распространении в областях, где отсутствуют прошивки (между стежками и строчками) после разрушения предыдущего переплетения прошивочных нитей или строчки соответственно (локальная область ЛО2) (рис. 6).

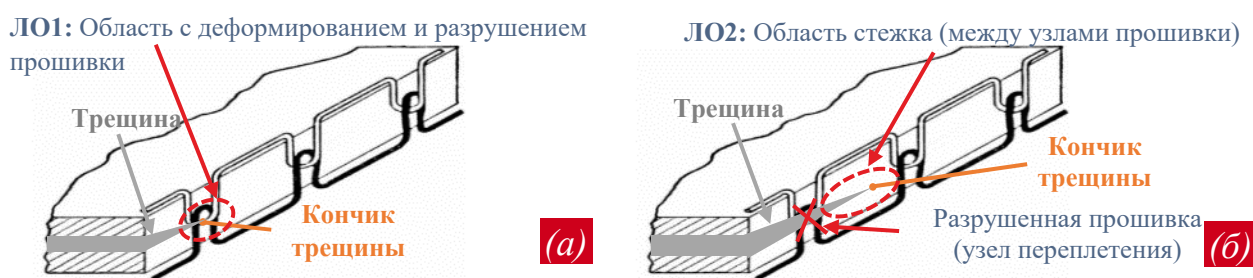


Рис. 6 – Схематические указания областей основных локальных микромеханических процессов при прорастании трещины в прошитом Э-УКМ: (ЛО1) (а) и ЛО2 (б)

Обобщенные усредненные локальные эффективные (для образцов в целом) и удельные (отнесенные к числу строчек прошивки в образцах) параметры трещиностойкости прошитых Э-УКМ, рассчитанные в рамках ЛУМР по раскрытию и длине трещины при прохождении ее кончика в областях ЛО1 и ЛО2 и в разных направлениях относительно строчек прошивки свидетельствуют о резко выраженной локальности и анизотропии трещиностойкости прошитых Э-УКМ – зависимости определяемых параметров от области прохождения кончика трещины и количества разрушаемых стежков, а также от направления развития трещины относительно строчек прошивки соответственно.

Таким образом, для объективной оценки трещиностойкости тонколистовых прошитых Э-УКМ в рамках ЛУМР необходимо определять и

использовать удельные локальные параметры, учитывающие масштаб (размеры) образцов и направление распространения трещины, определяющие количество активных стежков при инициировании роста трещины.

Поскольку основной вклад в эффективные и удельные параметры трещиностойкости прошитых пластин Э-УКМ вносят области прошивок (ЛО1), для выявления факторов, определяющих свойства этих областей, в работе проведены *исследования деформационно-прочностных свойств индивидуальных прошивочных нитей и их переплетений*, пропитанных с отверждением связующим. Однако, полученные при этом данные свидетельствуют о полном отсутствии корреляции работы разрушения волокон с локальными параметрами межслоевой трещиностойкости прошитого Э-УКМ. Вероятнее всего это связано с принципиальным отличием в механизмах разрушения индивидуальных нитей и локальных узлов прошивки из них, сформированных непосредственно в материале в процессе его формования. Поэтому далее в работе были проведены *исследования локальной межслоевой прочности и работы разрушения отдельных узлов прошивок* в отформованных и прошитых пластинах Э-УКМ с использованием образцов с выделенной локальной зоной контакта слоев с одним и двумя узлами прошивки (стежками) и без них (см рис. 3).

С точки зрения общих представлений ЛУМР удельная работа разрушения (W_P) эквивалента критическому значению интенсивности высвобождения упругой энергии при инициировании и росте трещины (G_{IC}). Это позволяет выявить корреляцию между межслоевой работой разрушения локальных зон контакта слоев образцов с отдельными прошивками (узлами и стежками) или без прошивок и удельными энергетическими параметрами локальной трещиностойкости в областях ЛО1 и ЛО2, определенными методом расклинивания в рамках ЛУМР (рис. 7).

Таким образом, разработанные и апробированные методики определения локальных параметров межслоевой трещиностойкости и прочности показали свою адекватность, дополняя друг друга, при оценке эффективности трансверсальной прошивки тонкослойных ПКМ, формуемых безавтоклавным методом вакуумной инфузии, как и другими методами.

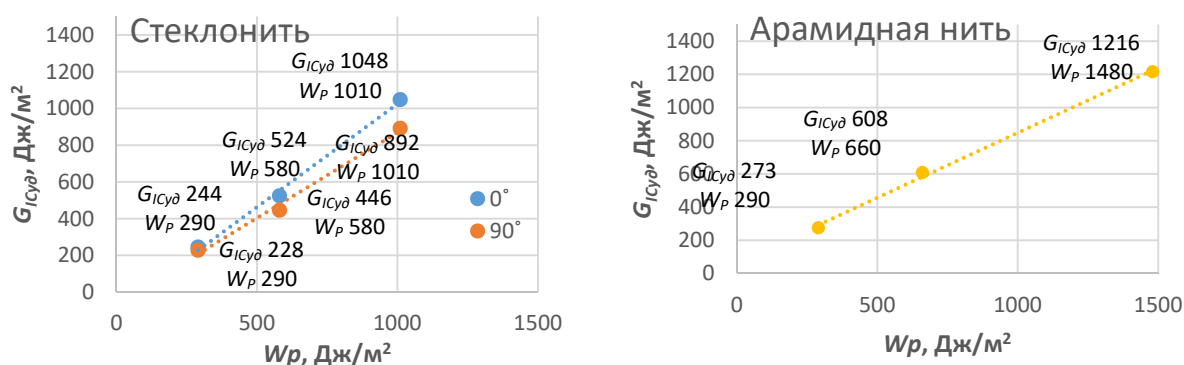


Рис. 7 – Примеры корреляционных связей средних значений удельной работы межслоевого разрушения W_p и локального удельного параметра трещиностойкости $G_{ICуд}$ слоистого Э-УКМ в области ЛО1

Глава V. Влияние прошивки на устойчивость тонколистового слоистого Э-УКМ к локальному внеплоскостному удару и ее корреляция с локальной межслоевой прочностью и трещиностойкостью

Глава V посвящена анализу и обобщению результатов систематических исследований характера и размера повреждений и остаточной прочности при продольном сжатии в плоскости армирующих слоев после внеплоскостного удара с различной энергией образцов тонколистовых пластин Э-УКМ, прошитых двумя типами высокопрочных нитей по усовершенствованной технологии с различным шагом прошивки (расстояние между строчками) и, соответственно, заданным количеством стежков в образце в целом.

Для количественной оценки зависимости повреждаемости образцов в области удара и остаточной прочности при продольном сжатии после удара с различной энергией от плотности (шага) прошивки, использовали глубину повреждения, отнесенную к исходной толщине образца (Δh , %), и количество прошивок, попавших в область повреждения (n), а в качестве приведенного параметра потери прочности после удара – прочность при сжатии прошитых образцов после удара, отнесенную к прочности непрошитых образцов ($\Delta \sigma_B$).

Полученные данные показывают, что с уменьшением шага прошивки относительная глубина повреждения в области удара с заданной энергией пропорционально уменьшается, а приведенная к непрошитым образцам остаточная прочность, как и количество прошивок в области удара, соответственно, линейно возрастают (рис. 8). При этом прошивка более прочной и менее хрупкой арамидной нитью проявляет несколько большую эффективность. С уменьшением энергии удара эти эффекты пропорционально

уменьшаются.

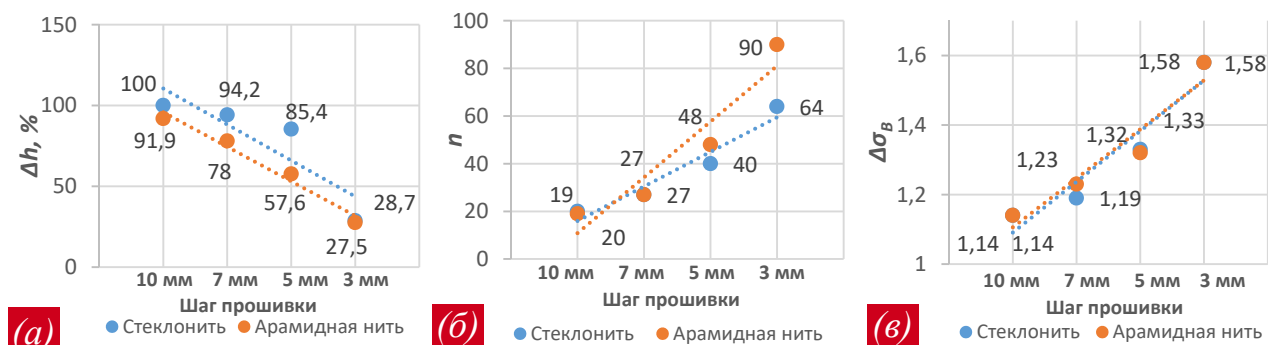


Рис. 8 – Примеры зависимостей Δh (а), n (б) и $\Delta\sigma_{\text{в}}$ (в) от шага прошивки стекляннй и арамидной нитями образцов Э-УКМ при энергии удара 40 Дж

Для выявления корреляционной связи между параметрами повреждаемости и остаточной прочности при сжатии после внеплоскостного удара и параметрами межслоевой прочности и трещиностойкости использовали сопоставление относительной глубины повреждения (Δh) и остаточной прочности после удара ($\sigma_{\text{в}}$) с заданной энергией 40 Дж с определенными в гл. IV методами ЛУМР и разрыва прошивок удельными энергетическими ($G_{\text{ICyд}}$, W_{P}) и силовыми (σ_{P}) параметрами, умноженными на число прошивок в области удара.

Для параметра трещиностойкости, определенного методом раскалывания в локальной области ЛО1, использовали приведение $G_{\text{ICyдхл}}$. Удельную работу W_{P} и напряжение разрыва σ_{P} рассчитывали, используя значения для одного узла и одного стежка (двух узлов) прошивки, и умножая их на число узлов и стежков прошивок в области удара ($W_{\text{PхN}}$ и $\sigma_{\text{PхN}}$), где $N = n$ или $N = n/2$ соответственно. Полученные зависимости между этими параметрами свидетельствуют об их достаточно хорошей корреляции.



Рис. 9 – Примеры корреляционных зависимостей между параметрами поврежденности Δh (а) и остаточной прочности при сжатии $\sigma_{\text{в}}$ (б, в) после внеплоскостного удара с энергией 40 Дж и энергетическими параметрами межслоевой трещиностойкости и прочности ($G_{\text{ICyдхл}}$, $W_{\text{PхN}}$ соответственно)

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Обобщена информация о слоистых Э-УКМ, формуемых технически и экономически эффективным способом вакуумной инфузии и перспективных при среднесерийном производстве крупногабаритных элементов конструкций, но не устойчивых к межслоевым повреждениям. Анализ существующих способов межслоевого армирования показал, что совершенствование простого способа машинной прошивки способно обеспечить решение этих проблем.

2. Предложены технические решения по усовершенствованию и оптимизации процесса машинной прошивки слоев равнопрочной углеродной ткани двойным челночным стежком в технологии вакуумной инфузии, обеспечивающие сохранение эффективного армирования в плоскости слоев и проявление эффекта локального межслоевого (трансверсального) армирования слоистого Э-УКМ.

3. Комплексным экспериментальным исследованием выявлено влияние основных параметров прошивки (типа прошивочной нити, шага и направления строчек прошивки) на микро- и макроструктурные дефекты (повреждения), деформационно-прочностные свойства в плоскости слоев, межслоевую локальную трещиностойкость и остаточную прочность при сжатии после внеплоскостного (нормального к поверхности) удара тонколистовых пластин на основе углеродной ткани и эпоксидного связующего, формуемых методом вакуумной инфузии с усовершенствованным процессом машинной прошивки стеклянной и арамидной нитями.

4. Установлено, что основными факторами, определяющими негативное влияние прошивки на структурную однородность и стандартные показатели прочности и жесткости прошитых двумя типами нитей пластин Э-УКМ в плоскости слоев, являются механические повреждения (искривление и разрушение) волокон ткани, а также вытеснение этих волокон из локальных участков прокола иглой слоев ткани, с формированием вокруг них слабых полых или обогащенных связующим зон. Вклад этих факторов в изменение прочности и жесткости прошитых композитов в плоскости слоев, в решающей степени определяется шагом прошивки.

5. Разработаны и внедрены в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина» методики определения локальных (в областях прошивок ЛО1 и вне их ЛО2) энергетических параметров межслоевой трещиностойкости

тонколистового прошитого и непрошитого Э-УКМ в рамках ЛУМР раскрытием заданной трещины клином (нагрузением по моде I), а также прочности при разрыве и работы разрушения локальных межслоевых контактов, в том числе индивидуальных прошивок (с одним или двумя узлами переплетения прошивочных нитей), сформированных при прошивке и формования материала.

6. Впервые с помощью разработанной оригинальной методики расклинивания образцов с заданной межслоевой трещиной выявлены локальность и анизотропия трещиностойкости при трансверсальной прошивке тонколистовых слоистых ПКМ: резко выраженные зависимости определяемых параметров межслоевой трещиностойкости от места нахождения кончика трещины при инициировании ее роста (в узлах прошивки, ЛО1 или вне их, ЛО2), от направления прохождения трещины относительно швов (вдоль и поперек) и от количества активных стежков (узлов или прошивок), с которыми кончик трещины одновременно может взаимодействовать.

7. Впервые определены прочность и работа разрушения при разрыве индивидуальных стеклянной и арамидной прошивочных нитей и их переплетений, а также отдельных стежков и узлов прошивки и непрошитых участков между слоями тонколистовых Э-УКМ. Установлено отсутствие корреляции этих показателей, определенных для индивидуальных нитей и их переплетений, и ее наличие для локальных зон контакта слоев с локальными параметрами межслоевой трещиностойкости.

8. Показано, что для объективной оценки трещиностойкости тонколистовых прошитых Э-УКМ в рамках ЛУМР необходимо определять и использовать удельные локальные параметры, учитывающие масштаб (размеры) образцов, направление распространения трещин и количество активных стежков.

9. Установлено, что решающее влияние на размеры повреждений и остаточную прочность при сжатии в плоскости слоев после внеплоскостного локального удара с заданной энергией оказывают шаг прошивки, определяющий как общее количество строчек и прошивочных стежков в образце и общую плотность прошивки, так и количество стежков в области удара.

10. Выявлена достаточно четкая корреляция между параметрами поврежденности и остаточной прочности при сжатии в плоскости армирования после внеплоскостного удара с различной энергией и локальными параметрами

межслоевой прочности и трещиностойкости при прошивке Э-УКМ как стеклянной, так и арамидной нитями, в широком интервале шага прошивки.

Список основных публикаций по теме работы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, и патентов на изобретение

1. Степанов Н.В., Соколова А.В., Сеницын А.Ю., Мазур В.В., Портнова Я.М. Способ изготовления изделия из композиционного материала. // Патент RU 2627882. Выдан 14.08.2017;

2. Влияние трансверсальной прошивки на деформационно-прочностные характеристики и остаточную прочность после удара слоистого ПКМ на основе равнопрочной углеродной ткани и эпоксидного связующего. / Бабаевский П.Г., Сеницын А.Ю., Сеницына А.В. // Конструкции из композиционных материалов. 2019. №4. С. 39-44.

3. Определение межслоевой трещиностойкости прошитых тонколистовых эпоксидных углекомполитов методом расслоения клином (расклинивания). / Бабаевский П.Г., Сеницын А.Ю., Матюшевский Н.В., Попов А.Г., Мазур В.В., Свиридов А.Г. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т89. №1. С. 56-66.

4. Сеницын А.Ю., Матюшевский Н.В., Синенков А.Н. Способ определения показателей трещиностойкости композиционных материалов с трансверсальным армированием прошивочной нитью. // Патент RU 2799034. Выдан 03.07.2023.