

**ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО
СУХОГО**

(ОКБ Сухого)

Поликарпова ул., д. 23 Б, Москва, 125284
тел.: (499) 550 01 06, (495) 780 24 90
факс: (495) 945 68 06
e-mail: info@su.uacrussia.ru

ОГРН 1067759884598, ОКПО 98253307
ИНН 7708619320, КПП 997450001

20.06.2025 г. № ОКБ/406003/96

На _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый заместитель управляющего
директора -
директор ОКБ Сухого
(ПАО «ОАК» «ОКБ Сухого»),
К.Т.Н.



М.Ю. Стрелец

2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

Синицына Артема Юрьевича на тему «Совершенствование процесса
трансверсальной прошивки тонколистовых слоистых эпоксиглекомполитов и
ее влияние на их деформационно-прочностные свойства и межслоевую
трещиностойкость», представленной на соискание ученой степени кандидата
технических наук
по специальности 2.6.17. «Материаловедение» (технические науки)

Актуальность работы

Характерной особенностью разработки конструкционных слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) для авиационных изделий является необходимость комплексного подхода, включающего как научно-обоснованный выбор компонентов материала и технологии формования, так и оценку влияния его структуры и технологических параметров производственных процессов на эксплуатационные характеристики. В общем плане, эта концепция сводится к выявлению взаимосвязи между структурой материала с основными свойствами, влияющими на несущую способность изделий, и технологическими параметрами процессов получения изделий из него. Применительно к обладающим повышенной устойчивостью к межслоевым расслоениям, трансверсально прошитым ПКМ, формуемым методом вакуумной инфузии, задача усложняется вариабельностью параметров самой прошивки и технологических параметров процесса. При этом дискретно распределенные трансверсальные элементы прошивки обуславливают также сложность оценки

ее эффективности стандартизованными методами по сравнению с непрошитыми материалами.

Поэтому каждое предложение по эффективному решению этой проблемы вносит существенный вклад в современное материаловедение. Следует отметить, что несмотря на значительное количество публикаций, посвященных изучению модификации свойств слоистых композиционных материалов за счет трансверсальной прошивки, использование полученных результатов на практике в аэрокосмической технике сдерживается отсутствием многофакторного анализа взаимного влияния такого упрочнения на комплекс механических характеристик и достоверных методик определения характеристик, учитывающих имеющиеся неоднородности материалов. В этой связи диссертационная работа Сеницына А.Ю., направленная на оценку эффективности усовершенствованной прошивки применительно к разработке научно-обоснованных принципов проектирования и изготовления элементов конструкций авиационной техники из ПКМ методом вакуумной инфузии с повышенной устойчивостью к расслоениям, представляет несомненную актуальность как с научной, так и с практической точки зрения.

Общая характеристика работы

Достоинством диссертационной работы Сеницына А.Ю. является то, что автору удалось произвести комплексную оценку влияния трансверсальной прошивки тонколистовых углекомпазитов (УКМ) на деформационно-прочностные свойства в плоскости слоев, устойчивость к межслоевому расслоению и к удару с повышением достоверности получаемых данных за счет совершенствования процесса машинной прошивки, и локализации оцениваемых характеристик к ее элементам и структуре. Для прошитых двойным челночным стежком УКМ, формуемых методом вакуумной инфузии, был проведен анализ и определено влияние параметров прошивки на макро- и микроструктурные повреждения слоистого УКМ, снижающие эффективность армирования в плоскости слоев. На этой основе, при оптимизации процесса прошивки, автором предложены технические решения, позволяющие минимизировать структурные повреждения.

В работе предложена специально разработанная оригинальная методика расклинивания прошитых и непрошитых образцов ПКМ типа двухконсольной балки (ДКБ) с заданной межслоевой трещиной по моде I. Моде I рассматривается, как наиболее опасная для слоистых ПКМ. Методика заключается в определении критического значения интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины в прошитых образцах. С использованием этой методики проведена оценка локальных показателей межслоевой трещиностойкости с учетом области прохождения кончиком трещины в прошитых образцах: при росте трещины в областях узла

переплетения прошивочных нитей в стежке, с его деформированием и разрушением, и областях без элементов прошивки, между узлами переплетения после разрушения предыдущего узла. При этом показано, что для объективной оценки трещиностойкости прошитых ПКМ более эффективно использование удельных локальных параметров, учитывающих размеры и направление распространения трещины.

Для выявления факторов, определяющих свойства локальных областей прошитых ПКМ, разработана методика определения локальной межслоевой прочности и работы разрушения при отрыве. Оценка этих показателей была проведена на прошитых образцах трех типов. Образцов с выделенной локальной зоной межслоевого контакта содержащих один узел прошивки, два узла и область между узлами прошивки. Установленные корреляционные связи между межслоевой работой разрушения локальных зон контакта слоев образцов с отдельными элементами прошивки или без них и удельными энергетическими параметрами локальной трещиностойкости, определенными методом расклинивания, показали адекватность разработанных методик при оценке эффективности трансверсальной прошивки к межслоевым разрушениям.

Выявлены зависимости параметров повреждаемости и остаточной прочности при сжатии после внеплоскостного удара от шага прошивки и энергии удара, а также установлены корреляционные связи этих параметров с параметрами локальной удельной трещиностойкости и работой разрушения локальных контактов при отрыве. Полученные зависимости свидетельствуют о достаточно близкой корреляции между сравниваемыми значениями для двух типов прошивочных нитей, рассматриваемых в работе.

Научна новизна

Научная новизна диссертационной работы Синицына А.Ю. не вызывает сомнения. Автором впервые разработана комплексная методология экспериментальной оценки устойчивости прошитых композитов к расслоению, сочетающая оригинальные подходы к исследованию процессов расклинивания образцов прошитых слоистых ПКМ с заданной межслоевой трещиной и разрушения локальных зон межслоевого контакта при отрыве.

В работе впервые выявлены эффекты локальности и анизотропии трещиностойкости прошитых ПКМ. Проведенная количественная оценка эффективных и удельных параметров показывает более чем двукратное увеличение сопротивления росту трещины в области узлов переплетения прошивочных нитей по сравнению с областью без трансверсальных элементов прошивки.

Установление в рамках линейной упругой механики разрушения ранее неизвестных корреляционных зависимостей между этими параметрами и работой разрушения отдельных контактных зон при отрыве подтверждает

адекватность разработанной комплексной методологии и является важным научным результатом.

Особого внимания заслуживают полученные автором данные о влиянии шага прошивки на ударную стойкость прошитых композитов, впервые выявившие зависимость между локальной трещиностойкостью в узлах переплетения прошивочных нитей и остаточной прочностью после внеплоскостного удара. Полученные результаты расширяют представления о механизмах разрушения прошитых композитов и создают научную основу для разработки материалов с управляемыми эксплуатационными характеристиками.

Практическая значимость

Представленные в диссертационной работе научные результаты и практические разработки в области материаловедения и технологии прошивки слоистых ПКМ могут быть использованы для создания новых конструкционных ПКМ и изделий из них, применяемых в авиакосмической и смежных отраслях. Установленные корреляции между параметрами прошивки и механическими свойствами обеспечивают точность прогноза улучшения сопротивления расслоению и ударной стойкости тонколистовых прошитых УКМ, формуемых методом вакуумной инфузии. Научные и методические разработки автора могут найти применение при создании новых функциональных композиционных конструкций в научно-исследовательских институтах и конструкторских бюро, и способствуют решению проблем использования в авиастроении панелей из УКМ, формуемых методом вакуумной инфузии.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных в диссертационной работе научных результатов подтверждается применением современных методов исследования, проведенных на поверенном оборудовании в аккредитованной научно-исследовательской лаборатории. Физико-механические характеристики при растяжении, изгибе и сжатии до и после удара определены в соответствии с отечественными стандартами. Для определения параметров межслоевой трещиностойкости и локальной прочности прошитых ПКМ были разработаны специальные методики на основе аналогичных методов и макро- и микромеханических представлений линейно упругой механики разрушения.

Замечания

Отмечая достоинства диссертационной работы А.Ю. Сеницына, в качестве замечаний следует указать:

1. В главах 4 - 5 при представлении экспериментальных данных по межслоевой трещиностойкости, прочности прошивочных нитей, локальной прочности при отрыве и остаточной прочности при сжатии после удара

отсутствует информация о количестве испытанных образцов. Указание этих сведений необходимо для оценки достоверности результатов и возможности их воспроизведения.

2. Наблюдаемый в экспериментальных данных коэффициент вариации механических характеристик (за исключением остаточной прочности при сжатии после удара) превышает 10 %, что требует дополнительного обоснования причин такого разброса.

3. Целесообразно было бы дать пояснение, по каким критериям слоистые структуры, рассматриваемые в диссертации, отнесены к тонколистовым, в том числе с учетом исследования особенности нагружения (разрушения) прошивочных нитей в трансверсальном направлении.

4. Целесообразно провести исследование образцов с одинаковыми схемами армирования и прошивки при различных видах испытаний. Так, определение зависимости прочностных характеристик пластика от схемы прошивки проведено на ортогонально армированных образцах, а оценка влияния ударных повреждений – на образцах с квазиизотропной укладкой.

5. В работе в явном виде не представлено информации об изучении влияния высоты стежка на прочность, как при сдвиге, так и при растяжении.

Отмеченные недостатки не снижают научной и практической значимости диссертации и общей высокой оценки работы.

Заключение

Представленная диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены закономерности влияния параметров прошивки на структуру и механические свойства слоистых эпоксидных УКМ, формуемых методом вакуумной инфузии, которые позволили автору разработать принцип оценки допустимого снижения стандартных деформационно-прочностных свойств в плоскости слоев при существенном улучшении устойчивости к межслоевым расслоениям.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 7 научно-технических конференциях, опубликованы в 10 научных работах, из них 2 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и 2 патента на изобретение.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная работа удовлетворяет требованиям пп. 9 - 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Сеницын Артем Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата

технических наук по специальности 2.6.17. «Материаловедение» (технические науки).

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Отделения НТС ПАО «ОАК» в ОКБ ОТА (протокол № 7-25 от 18.06.2025 г.).

Заместитель председателя
Отделения НТС ПАО «ОАК» в ОКБ ОТА,
заместитель директора ОКБ Сухого -
директор по проектированию



Савельевских
Евгений Петрович

Главный конструктор -
Начальник НИО материалов и
технологий,
канд. техн. наук, доц.



Филатов
Андрей Анатольевич
19.06.25

Заместитель начальника
НИО материалов и технологий -
начальник отдела ПКМ



Морозов
Борис Борисович

Инженер-технолог 1 кат. отдела ПКМ



Демина
Анна Сергеевна

Инженер-технолог 1 кат. отдела ПКМ

Исхаков
Виктор Сергеевич