

## УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора

АО «ОНПП «Технология»

им. А.Г.Ромашина» по науке

кандидат технических наук

О.Н.Комиссар

«06» декабря 2021 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина на диссертационную работу Новикова Геннадия Витальевича «Оценка межслоевой трещиностойкости армированных слоистых ПКМ экспериментальными и численным методами», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение

Данная работа посвящена исследованию трещиностойкости слоистых ПКМ в авиационных конструкциях с внедрением в метод конечных элементов закона когезионной зоны.

**Актуальность темы диссертации.** Известно, что низкие значения межслоевой прочности и трещиностойкости современных ПКМ являются их существенным недостатком, что отрицательно влияет на эффективность применения композитов и обеспечение надежности элементов конструкций летательных аппаратов. Существующие на сегодняшний день методы не всегда позволяют достоверно оценить параметры межслоевой трещиностойкости армированных слоистых ПКМ. В настоящее время линейная упругая механика разрушения (ЛУМР) является одним из основных методов оценки трещиностойкости, как для проведения аналитических расчетов, так и в основе экспериментальных стандартов. Автором справедливо отмечается, что при сложной конфигурации образцов и дефектов оценка трещиностойкости методами ЛУМР значительно затрудняется или становится невозможной. Предлагаемый в работе метод на основе модели когезионной зоны (МКЗ), в котором разработанные в рамках ЛУМР физические (микромеханические) модели включены в анализ прикладных программ на основе метода конечных элементов (МКЭ), позволяет эффективно определять условия зарождения и роста трещины в местах концентрации напряжений. Кроме того, актуальность темы диссертации определяется недостаточной проработкой в отечественной и зарубежной литературе вопросов, связанных с комплексными исследованиями в области оценки трещиностойкости слоистых ПКМ с помощью экспериментально-расчётных методов.

Цели и задачи диссертации четко сформулированы и определяют структуру работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и заключения, и списка используемых источников. Работа изложена на 127 страницах и включает 47 рисунков и 20 таблиц.

**В первой главе** выполнен анализ литературных данных, сформулирована цель работы и задачи исследований. На основе обзора существующих решений установлено, что для оценки межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ более простым и эффективным является модель когезионной зоны (МКЗ), в котором в МКЭ имплантированы разработанные в рамках ЛУМР физические (микромеханические) модели, аналитически описывающие необратимые процессы упругопластического деформирования (в модели Дагдейла) и хрупкого или псевдо-хрупкого предразрушения (в модели Баренблатта).

**Вторая глава** содержит обоснование выбора объектов и экспериментальных методов исследования с учетом поставленных задач. Для получения экспериментальных данных в работе проведены три вида испытаний четырех типов ПКМ: для определения модуля упругости при одноосном растяжении, интенсивности высвобождения упругой энергии при нагружении по моде I и локальной межслоевой когезионной прочности при разрыве. Локальную межслоевую когезионную прочность определяли по нестандартной методике.

**В третьей главе** проведена методика создания конечно-элементной модели и описаны основные элементы, применяемые при моделировании процесса расслоения. Для проведения моделирования процесса расслоения образца и расчетов параметров трещиностойкости в 3D модель с когезионным слоем вводились экспоненциальная или билинейная форма закона когезионной зоны (ЗКЗ), и задавались экспериментально определенные упругие характеристики материала в различных направлениях по плоскостям, а также параметры: значения когезионной прочности, локальной деформации и рассчитанное значение длины когезионной зоны.

**В четвертой главе** представлены полученные экспериментальные результаты для 4-х типов образцов. На основании полученных экспериментальных данных рассчитано значение длины когезионной зоны для каждого типа ПКМ. Получены новые данные о влиянии состава ПКМ на трещиностойкость слоистых ПКМ. Экспериментально получены зависимости усилие-раскрытие трещины в процессе расслоения образцов из 4-х типов слоистых ПКМ и по ним рассчитаны критические значения интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещин. Впервые экспериментально получены данные о критических параметрах закона когезионной зоны: локальной межслоевой прочности и деформации при максимальной нагрузке, а также ее длине для органо-, стекло- и углекомполитов на основе эпоксидной, ПЭЭК и ПКА матриц. Выявлены закономерности изменения этих параметров, в зависимости от природы входящих в ПКМ компонентов.

**В пятой главе** приведены результаты анализа устойчивости к расслоению различных по составу армированных слоистых ПКМ с использованием экспериментально определенных параметров ЗКЗ. Обобщены экспериментально полученные значения критической интенсивности высвобождения упругой энергии ( $G_{IC}$ ), локальной когезионной прочности. Разработана и исследована 3D конечно-элементная модель критического роста трещины в двухконсольной балке с имплантированным экспоненциальным и билинейным законом когезионной зоны с использованием экспериментально определенных параметров когезионной зоны и упругих констант для 4-х типов ПКМ.

Представленные в работе исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы.

**Научную новизну диссертационной работы определяют следующие результаты исследований, полученные лично автором:**

1. Разработан метод численной оценки трещиностойкости слоистых ПКМ в условиях нагружения по моде I образцов в виде двухконсольной балки, основанный на использовании физической модели Баренблатта.

2. Разработанный расчетно-экспериментальный метод оценки трещиностойкости слоистых ПКМ позволил установить зависимости влияния свойств полимерной матрицы на длину когезионной зоны для углекомполитов на основе линейных и сетчатых полимеров. Численно установлено, на сколько свойства армирующего волокнистого наполнителя для стеклокомполитов и органокомполитов на поликапроамидной матрице оказывает меньшее влияние на длину когезионной зоны и трещиностойкость по сравнению с изменением природы полимерной матрицы.

3. Показано, что для достижения точности расчета усилия возникновения и развития трещины, соизмеримой с достижимой при применении ИЭ с экспоненциальным ЗКЗ, необходимо использовать большее количество ИЭ с билинейным ЗКЗ. Меньшее или равное их количество приводит к значительному (от 6% до 10%) расхождению расчётных и экспериментальных данных.

**Научная значимость** результатов исследований заключается в том, что разработанный и научно обоснованный новый метод позволяют осуществлять прогнозирование межслоевой трещиностойкости слоистых композиционных материалов. Установлено оптимальное количество интерфейсных элементов, что обеспечивает расхождение расчетных и экспериментально полученных значений не более 5% для слоистых органо-, стекло-, углекомполитов на основе термореактивных и термопластичных матриц при допустимом минимальном объеме вычислений.

**Практическое значение** работы определяется тем, что решенные автором задачи могут найти широкое применение в авиационной технике и других отраслях, связанных с применением ПКМ, что позволит увеличить надежность композиционных конструкций в

процессе их эксплуатации на основе разработанного автором 3D конечно-элементной модели критического роста трещины с имплантированным законом когезионной зоны (ЗКЗ) для простого образца в виде двухконсольной балки при нагружении по моде I. Это дает возможность использовать апробированные в 3D модели интерфейсные элементы для точной оценки зарождения и роста трещин в конструкциях с геометрией любой сложности при проектировании авиационной техники из новых материалов с требуемым комплексом физико-механических свойств.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 12 конференциях. По теме диссертации опубликованы 14 работ: из них 2 статьи входят в Перечень ведущих периодических изданий, рекомендуемых ВАК РФ, 1 статья в зарубежном научном издании, входящем в реферативную базу Scopus.

Работа является законченным научным трудом, имеющим единую стилистику. Положения, вынесенные на защиту, в достаточной мере обоснованы. Экспериментальная часть описана научным языком с грамотным использованием терминологии. Структура работы соответствует нормам, принятым для квалификационных научных работ.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

1. В диссертации не представлен список ученых, занимавшихся аналогичными проблемами.

2. Автореферат не содержит информации о внедрении результатов работы на предприятиях и научных организациях в виде разработанной технической документации.

3. Эксперимент на определение моды I следовало проводить по рекомендациям стандарта ASTM D5528 (нагружение образца осуществлять через шарнирный блок или петлю во избежание появления изгибных моментов), так как способ закрепления образца в испытательных захватах может значительно влиять на определяемую характеристику. Предварительное раскрытие или расклинивание образца в месте разделительной пленки может негативно влиять на результаты испытаний.

4. В экспериментальной части работы не сказано, какое количество образцов участвовало в эксперименте. Автор в своей работе не провел сравнение своей 3D модели с уже существующими показателями трещиностойкости слоистых композиционных материалов.

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности работы в области производства изделий из полимерных композиционных материалов.

Работа написана грамотно, стиль изложения доказательный. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

#### **Заключение**

Диссертация Новикова Геннадия Витальевича представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу. По научному уровню полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем

требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Новиков Геннадий Витальевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – «Материаловедение»

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден на заседании Ученого совета АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина» 06.12.2021 г., протокол № 8-2021. На заседании присутствовало 20 членов Ученого совета из 30. Результаты голосования: «за» - 20, против – нет, воздержавшихся - нет.

Начальник научно-исследовательской лаборатории  
исследования несущей способности конструкций,  
разработки методов и средств неразрушающего  
контроля и аттестации изделий из ПКМ  
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина»,  
кандидат технических наук

А.Г.Попов

Начальник научно-исследовательского сектора  
экспериментального определения прочностных и  
упругих свойств и несущей способности конструкций  
из полимерных композиционных материалов

Н.В.Матюшевский

Ученый секретарь  
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина»,  
кандидат технических наук

Н.И.Ершова

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»  
Государственный научный центр Российской Федерации  
249031, г.Обнинск, Калужской области, Киевское шоссе, 15  
E-mail: [info@technologiya.ru](mailto:info@technologiya.ru), факс (484) 396-45-75,  
Тел. (484) 399-68-68