

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук

Кондрашова Станислава Владимировича на диссертационную работу Шаталина Александра Андреевича на тему: «Экспериментальная оценка и численное моделирование межслоевой трещиностойкости тонкослойных слоистых стекло- и углекомполитов из вакуум-формуемых клеевых препрегов при индивидуальном и комбинированном растяжении и сдвиге», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

Актуальность работы обусловлена тем, что высокая удельная несущая способность элементов конструкций летательных аппаратов из слоистых полимерных композитов, в том числе выбранных объектов исследования, в плоскости армирования резко ослабляется межслоевым разрушением (расслоением) вследствие инициирования и роста трещин при действии растягивающих и сдвиговых нагрузок. Решение этой проблемы требует разработки комплексной методологии оценки устойчивости таких материалов к инициированию и распространению межслоевых трещин и локальному межслоевому разрушению, сочетающей экспериментальные и численные методы и позволяющей использовать полученные на простых образцах результаты при разработке сложных элементов конструкций, что и является целью и основным результатом диссертационной работы Шаталина А.А.

Общая характеристика работы.

В диссертационной работе обобщены данные о компонентном составе, технологии формования и свойствах слоистых стекло- и углекомполитов на основе клеевых связующих и армирующих волокнистых наполнителей,

используемых в производстве авиационной и ракетной техники, аналитических, экспериментальных и численных подходов к оценке межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ в рамках линейной упругой механики разрушения (ЛУМР) и межслоевой локальной прочности при индивидуальном и комбинированном нагружении при растяжении и сдвиге (по модам I и II).

Объектами исследований служили тонкие пластины СК на основе клеевого препрега КМКС-2м.120 и УК на основе клеевого препрега КМКУ-2м.120, отформованные вакуумным методом. Разработаны методики и экспериментально определены структурные характеристики пластин слоистых СК и УК и параметры их межслоевой трещиностойкости (критические значения интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины) в рамках ЛУМР с использованием простых образцов типа двойной консольной балки (ДКБ) и балки с концевым надрезом (БКН) с концевой межслоевой трещиной, нагружаемых по индивидуальным модам I и II (растяжением за концы полубалок и сдвигом при изгибе), а также образцов аналогичного типа с укороченной полубалкой, нагружаемых при изгибе вне и над ней (УПБ и НПБ соответственно) по комбинированной (смешанной) моде I/II с различной долей моды II в зависимости от начальной длины трещины. Для образцов типа ДКБ и БКН, в которых реализуются индивидуальные моды нагружения трещины, критические значения трещиновдвигущей силы (ТДС), определяемые по максимальной нагрузке, инициирующей рост трещины, непосредственно равны критериям роста трещин, т.е. параметрам трещиностойкости (ТС) при этих модах нагружения. Для образцов типа УПБ и НПБ, в которых критический рост трещины обусловлен сочетанием растягивающей и сдвиговой нагрузок, и критическое значение ТДС равно сумме вкладов отдельных мод, такой критерий или параметр ТС в зависимости

от доли моды II рассчитывали по критериальному уравнению Бензегга-Кенана. При этом показатель степени при доле моды II в этом уравнении является материальной константой.

В работе разработаны также экспериментальные методики и определены параметры локальной межслоевой прочности слоистых СК и УК при нормальном растяжении и чистом сдвиге, необходимые для численного моделирования. В программном комплексе ANSYS разработаны трехмерные конечно-элементные численные модели инициирования роста трещин в образцах слоистых СК и УК типа ДКБ и БКН с использованием метода когезионной зоны (МКЗ) и в образцах типа УПБ и НПБ с использованием метода виртуального закрытия трещины (МВЗТ). С помощью разработанных численных моделей образцов и с использованием экспериментально определенных параметров межслоевой локальной прочности получены графики в координатах нагрузка-деформация до инициирования и роста заданной трещины. По максимальной (критической) нагрузке на образцы определяются параметры трещиностойкости. Установлено влияние размеров конечно-элементной сетки и, соответственно, числа интерфейсных (в МКЗ) и твердотельных (в МВЗТ) элементов по длине (траектории роста) трещины на точность численного предсказания начала расслоения с целью минимизации объема вычислений при обеспечении их достаточной точности. Адекватность моделей установлена путем сравнения результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными о критической нагрузке инициирования межслоевого роста трещин в исследованных армированных слоистых ПКМ. Показано, что методы когезионной зоны и виртуального закрытия трещины, имплементированные в метод конечных элементов, апробированные на простых образцах с применением необходимых экспериментальных данных, могут быть использованы с высокой степенью

адекватности и точности для оценки межслоевой трещиностойкости и прогнозирования устойчивости к расслоениям более сложных конструктивно-подобных элементов конструкций.

Научная новизна работы заключается в разработке и подтверждении модели, которая позволяет оценить межслоевую трещиностойкость слоистых ПКМ в условиях нагружения по комбинированной (смешанной) моде I/II. Данная модель основана на использовании представления трещины Баренблатта и критерия Бензегга-Кенана.

Впервые экспериментальными методами определены параметры когезионной зоны и критериального уравнения разрушения слоистых СК и УК при смешанной моде нагружения и выявлено влияние природы армирующего наполнителя на эти параметры. Показано, что эти параметры сравнительно мало зависят от типа волокнистого армирующего наполнителя и определяются природой полимерной матрицы.

В работе разработаны трехмерные численные модели критического роста межслоевых трещин в слоистых армированных ПКМ как при индивидуальном, так и при комбинированном нагружении по модам I и II с использованием экспериментально определенных локальных межслоевых свойств с учетом анизотропии материалов и с учетом анизотропии материалов и геометрии моделей. Разработанные модели, обеспечивающие достоверную оценку межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ, базируются на методе конечных элементов с внедренными в него интерфейсными элементами когезионной зоны (метод МКЗ) и локальными узлами твердотельных элементов (метод МВЗТ) по траектории роста трещины, свойства которых задаются экспериментально определяемыми характеристиками. Выявлена минимально допустимая длина интерфейсных и твердотельных элементов с заданными свойствами, равная 1 мм, и установлены ее оптимальные размеры

и, соответственно, количество КЭ, обеспечивающее расхождение расчетных и экспериментально полученных значений не более 5% при реальном объеме вычислений.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе Шаталина А.А., базирующиеся на фундаментальных основах линейной упругой механики разрушения псевдохрупких материалов в рамках микромеханических представлений о процессах предразрушения вблизи кончика трещины и на использовании современных экспериментальных методов определения параметров этих процессов и их численного моделирования, не вызывают сомнений. Достоверность полученных результатов подтверждается адекватным совпадением численных расчётов с экспериментальными данными.

Практическая значимость работы заключается в применении разработанной модели и полученных экспериментальных и расчетных данных для оценки и прогнозирования межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ при разработке способов ее повышения, а также при разработке методов численных расчетов устойчивости к зарождению, инициированию и росту трещин в элементах конструкций авиационной техники из слоистых ПКМ.

Замечания по диссертации и автореферату.

К содержанию работы могут быть сделаны следующие замечания:

1. В диссертации приведены расчеты параметров краевой зоны трещины лишь для одного связующего ВСК-14-2М. По мнению оппонента, расширение ряда используемых связующих, вероятно, позволит установить связь между параметрами краевой зоны и вязкоупругими характеристиками полимерной матрицы. Если такая связь существует, то данная информация может быть

полезна для разработчиков связующих. Установление такой связи ещё более увеличила бы ценность настоящей работы.

Указанное замечание, носит рекомендательный характер, может рассматриваться как одно из направлений дальнейшей работы, не снижает значимости полученных результатов и не влияет на общую положительную оценку диссертационного исследования А.А. Шаталина.

Заключение.

В целом представленная диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, выполненной под руководством доктора технических наук, профессора П.Г. Бабаевского, содержащей новое решение актуальной научно-технической задачи по разработке комплексной методологии и оценке устойчивости слоистых ПКМ на примере стекло- и углекомполитов из клеевых препрегов к инициированию и распространению межслоевых трещин при индивидуальных и комбинированных нагрузках, сочетая экспериментальные и численные методы. Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне. Ее содержание соответствует специальности 2.6.17 – Материаловедение (технические науки), полностью отражено в автореферате и соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842. Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 9 научно-технических конференциях, опубликованы в 12 печатных работах, в том числе в двух статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, из которых 1 статья опубликована в журнале, включенном в международную систему цитирования. Результаты диссертационной работы могут быть

использованы в области авиастроения, при проектировании ответственных деталей из ПКМ.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению автор представленной диссертационной работы Шаталин Александр Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 — Материаловедение (технические науки).

Официальный оппонент

Ведущий научный сотрудник

РУНЦ «Безопасность»

МГТУ им. Н.Э. Баумана,

Доктор технических наук

специальность 05.16.09 —

Материаловедение (машиностроение)

С.И. Кондрашов
20.11.2024

Кондрашов

Станислав Владимирович

Региональный учебно-научный центр «Безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Адрес: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская д. 5, стр. 1

E-mail: zi@runsec.ru

Телефон: +7 (495) 120-29-20

Подпись Кондрашова Станислав Владимирович удостоверяю,

ВЕРНО.

СПЕЦИАЛИСТ ПО ПЕРСОНАЛУ

**ОТДЕЛА КАДРОВОГО
АДМИНИСТРИРОВАНИЯ**

ЦЕПОК М. Ю.



Цепок М. Ю.

ФИО