Акционерное общество
«КОМПОЗИТ»

Пионерская ул., д. 4, г. Королёв, Московская область,
Россия, 141070 Телеграф БЕРЕЗА
тел. (495) 513-2028, 513-2329
канцелярия 513-2256, факс (495) 516-0617
E-mail: info@kompozit-mv.ru
ОКПО 56897835, ОГРН 1025002043813, ИНН / КПП 5018078448 / 501801001

_____ исх. № _____
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ
Первый заместитель генерального
директора АО «Композит»,
канд. физ.-мат. наук
_____ А.Э. Дворецкий
«09» 04 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Воробьёва Игоря Андреевича «Критерий прочности многослойных полимерных композиционных материалов при статическом и циклическом нагружении», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела

Актуальность темы исследования. В настоящее время для создания нагруженных конструкций авиационной и ракетно-космической техники широко применяются полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые обладают высокими удельными прочностными и жесткостными характеристиками. Применение конструкций из ПКМ осложнено существенной анизотропией характеристик. Для проектирования ответственных конструкций ракетно-космических техники из ПКМ крайне

важно знать не только базовый набор физико-механических и теплофизических характеристик, но и критерии прочности при статических и динамических нагрузках, что позволит достичь требуемых коэффициентов безопасности. В связи с чем, диссертационная работа посвящена актуальной теме в области разработки критериев прочности многослойных полимерных композиционных материалов при статическом и циклическом нагружении.

Цель работы: Разработка экспериментально обоснованных критериев статической и циклической прочности полимерных композиционных материалов для прогнозирования ресурса многослойных композитных конструкций.

Основные результаты работы:

1. Разработан метод оценки статической прочности полимерных композиционных материалов основанный на предположении об упругом характере деформирования ортотропного материала и модифицированном критерии прочности Хашина.

2. Разработан новый критерий усталостной прочности полимерных композиционных материалов, включающий аналитическое уравнение кривой усталости, связывающее количество циклов до разрушения с максимальным значением индикатора прочности в цикле.

3. Разработан метод определения параметров кривой усталости по результатам экспериментов при заданных коэффициентах асимметрии и числа циклов до разрушения при циклическом нагружении.

4. Предложено уточнение критерия прочности Хашина, позволяющее повысить точность оценки момента разрушения армирующего волокна при растяжении при наличии сдвиговых напряжений.

5. Разработан метод определения параметров модели деформирования и критериев статической и циклической прочности, основывающийся на минимально возможном количестве экспериментальных данных.

Научная новизна работы:

1. Разработан новый критерий циклической прочности полимерных композиционных материалов, позволяющий определять ресурс слоев материала при циклическом нагружении.

2. Предложен уточненный критерий статической прочности полимерных композиционных материалов.

3. Разработан метод определения параметров материала и критериев статической и циклической прочности полимерных композиционных материалов по ограниченному набору экспериментальных данных.

Практическая значимость работы: Результаты исследования позволяют повысить точность оценки статической и циклической прочности конструкций из полимерных композиционных материалов. Результаты работы внедрены в расчетную практику Центра прикладных исследований АО «ЦНИИмаш» и используются при проведении прочностных расчетов композитных конструкций.

Кроме того, возможно дальнейшее использование предложений автора при прочностных расчетах крупногабаритных несущих конструкций из ПКМ, подверженных статическим и циклическим нагрузкам.

Степень достоверности диссертационной работы подтверждается сопоставлением результатов расчетных и экспериментальных исследований как для однонаправленных образцов, так и для образцов с симметричной и квазиизотропной схемой армирования.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура диссертации. Диссертация включает в себя 126 страниц, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений.

Во введении представлена общая характеристика диссертационной работы, приведена актуальность научного исследования, цель и задачи исследования, научная новизна, степень разработанности темы исследования,

теоретическая и практическая значимость, а также методы исследования, личный вклад автора и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации рассматриваются различные методы проведения испытаний полимерных композиционных материалов в целях определения их жесткостных и прочностных характеристик. Автор приводит обзор исследований не только отечественных, но и зарубежных источников. Отдельное внимание уделяется усталостной прочности, поскольку прогнозирование усталостного ресурса полимерных композиционных материалов является актуальной и перспективной задачей в настоящее время.

Во второй главе диссертации приводится краткое обоснование выбора модели упругого деформирования, критерия прочности и структурного подхода к математическому моделированию полимерных композиционных материалов. Автор приводит разработанный им метод идентификации параметров модели деформирования и критерия прочности по результатам испытаний однонаправленных образцов ПКМ с использованием поворота системы координат образца к главным осям материала.

В третьей главе диссертации рассматриваются результаты экспериментальных исследований как проведенные лично автором, так и заимствованные из литературных источников. Показано, что определение всех параметров критерия прочности по результатам испытаний однонаправленных полимерных композиционных материалов не представляется возможным, рекомендуется использовать образцы с симметричной схемой разориентации слоев. Также автор предлагает уточнение для выражения индикатора прочности при растяжении, такое описание экспериментальных исследований представляет научные интерес.

Четвертая глава полностью посвящена разработке метода оценки усталостной прочности полимерных композиционных материалов. Автор разделяет результаты испытаний при знакопостоянных циклах нагружения по механизмам разрушения и представляет их в виде зависимости «индикатор прочности – число циклов». Такая интерпретация результатов испытаний

свидетельствует о том, что в рамках одного механизма разрушения вид кривой усталости не зависит от угла выкладки, что представляет научный интерес. Приводится обоснованный выбор аналитического уравнения для аппроксимации кривых усталости и вводится понятие коэффициента асимметрии в индикаторах прочности. Результаты испытаний представляются в виде зависимости «индикатор прочности – коэффициент асимметрии в индикаторах прочности» и, с использованием метода экстраполяции, предложенный автором подход распространяется на весь диапазон коэффициентов асимметрии от симметричного цикла до статического нагружения.

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Соответствие научной специальности. Работа соответствует паспорту специальности 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела по двум направлениям исследований: п.4 Механика композиционных материалов и конструкций, механика интеллектуальных материалов, п.12 Вычислительная механика деформируемого твердого тела.

Основные замечания

1. В диссертационной работе есть отдельные опечатки и неточности, в частности: нумерация таблицы стр. 57; нумерация рисунков стр. 106 – 108.
2. При численном моделировании испытаний образцов из ПКМ не приведены данные по типам контактных элементов и условиям контакта, а также результаты применения предложенного критерия прочности.
3. При проведении расчетов и построения критерия прочности не рассмотрены вопросы влияния адгезионной прочности на границах раздела «волокно – матрица».
4. В работе не указаны ограничения на схемы армирования, толщины конструкций из ПКМ, где возможно применение разработанного критерия прочности.

Представленные замечания не снижают общей положительной оценки от диссертационной работы Воробьёва И.А.

Заключение. Диссертационная работа Воробьёва И.А. на тему «Критерий прочности многослойных полимерных композиционных материалов при статическом и циклическом нагружении» является законченной научно-квалификационной работой и содержит новое решение актуальной задачи по оценке циклической прочности образцов из полимерных композиционных материалов.

Диссертационная работа полностью соответствует специальности 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней». Автор диссертации заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела.

Отзыв составлен на основании выписки из заседания Подсекции комплекса «Неметаллические материалы» Научно-технического совета АО «Композит» от «07» апреля 2025, протокол № П-25-13.

Начальник отдела разработки и
изготовления деталей из полимерных
композиционных материалов АО «Композит»,
канд. техн. наук К.В. Михайловский

Адрес АО «Композит»: 141070, Россия, Московская область,
г. Королёв, ул. Пионерская, д.4
Раб. телефон: +7 495 513 23 61
http://www.kompozit-mv.ru
E-mail: info@kompozit-mv.ru

Подпись и должность Михайловского Константина Валерьевича заверяю:

Начальник отдела кадров АО «Композит» Т.Ф. Петрова