

ОТЗЫВ
официального оппонента
на диссертационную работу Воробьёва Игоря Андреевича
«Критерий прочности многослойных полимерных композиционных
материалов при статическом и циклическом нагружении»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата технических наук по специальности 1.1.8.
«Механика деформируемого твёрдого тела».

Актуальность темы исследования

Диссертация Воробьёва Игоря Андреевича посвящена разработке и экспериментальной проверке критериев разрушения изделий из мягких полимерных материалов, армированных прочными непрерывными волокнами (композиты на полимерной основе).

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованной литературы и двух приложений. Материал изложен на 126 страницах и включает в себя текст, 55 рисунков, 10 таблиц и 2 приложения. Список литературы содержит 153 наименования. Оформление диссертации соответствует требованиям, установленным правилам и стандартам.

Во введении отмечено, что композиционные материалы широко распространены в природе. Отмечается также, что композиты на полимерной основе, армированные различными волокнами, нитями, лентами и т.д., часто используются в различных изделиях. Такие изделия являются неоднородными, анизотропными материалами и обладают высокими прочностными свойствами. Отмечено также, что наилучшими прочностными и термостойкими свойствами обладают композиты на полимерной, а также на углеродной основе с углеродными наполнителями (углерод углеродные композиты, иначе углепластики). *Целью диссертационной работы является разработка и экспериментальная проверка критериев статической и циклической прочности полимерных композитов.*

В первой главе, которая содержит 13 страниц текста, дан обстоятельный литературный обзор экспериментальных и теоретических исследований процессов деформирования и разрушения полимерных композиционных материалов.

Во второй главе (19 стр.) рассмотрены законы теории упругости для анизотропных однородных материалов в общем случае, а также при наличии различных типов симметрии упругих свойств. Наибольшее внимание уделено ортотропным и трансверсально изотропным материалам. В последнем случае всё тело условно разбивается на тонкие слои, армированные параллельными волокнами. При этом предполагается, что поперечные напряжения в каждом слое пренебрежимо малы и их можно не учитывать, то есть можно положить их равными нулю. Таким образом, выделенный слой рассматривается как тонкая

пластина, армированная параллельными волокнами. В этой пластине отличны от нуля только три компонента тензора напряжений, а именно два продольных и сдвиговое напряжения. Для того чтобы от этих напряжений пластина не разрушилась, из множества критериев разрушения, предлагается тензорно-полиномиальный критерий. Кроме этого, рассмотрен также критерий Цая-Ву, который практически не отличается от тензорно полиномиального критерия. Рассмотрен также критерий Хашина, позволяющий оценивать предельное состояние матрицы и волокна в зависимости от характера напряжений в матрице и от напряжений в каждом волокне.

В третьей главе пакет одинаковых слоёв рассматривается как один однородный слой с суммарной толщиной, равной толщине пакета, обладающего усреднёнными характеристиками. Автор диссертации ссылается на статью Jen & Lee 1998 года, в которой были приведены результаты экспериментов по определению усредненных упругих свойств в различных направлениях к армировке. В диссертации в таблице 3.1.1. приведены модули упругости по направлению армировки и поперёк армировки, а также коэффициенты Пуассона при продольной и поперечной деформации. Кроме этого, приведена формула для модуля сдвига. Рассматриваются случаи нагружения в направлении армирования (0 градусов) и в поперечном направлении (90 градусов), а также в наклонных направлениях с шагом 15 градусов. Приводятся диаграммы зависимости в абсолютных значениях усреднённых коэффициентов упругости при растяжении и сжатии. Отмечено, что при сжатии разрушение образцов согласуется с критериями разрушения матрицы. Рассмотрена, более выгодная схема, симметричного армирования. Подробно изучены критерии разрушения при растяжении и сжатии углепластиков в зависимости от угла выкладки углеродных волокон. В диссертации предложен и экспериментально проверен модифицированный критерий Хашина, который более точно оценивает критические напряжения в изделиях при различных нагружениях.

Четвёртая глава. Данная глава посвящена оценке прочности углепластиков при циклических нагружениях. Представлены результаты экспериментальных исследований при циклическом нагружении однонаправленных образцов, армированных в направлениях 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° и 90° . Разрушение образцов такого углепластика с углами армирования 15° , 30° , 45° , 60° , 75° и 90° происходит по механизму разрушения матрицы, а при 0° – по механизму волокна, что характерно как при испытаниях на растяжение, так и на сжатие.

В заключении отмечено, что разработан метод оценки прочности армированных ПКМ объединяющий в себя структурный подход к оценке напряженно-деформированного состояния, позволяющий проводить расчеты пакетов ПКМ с различными вариантам выкладки слоев материала. Сформулированы основные результаты, полученные лично автором диссертации. Предложено уточнение критерия Хашина, позволяющее учесть влияние сдвиговых напряжений на предел прочности армирующего волокна при растяжении образца с углами разориентации волокон $5^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$.

Научная новизна

В диссертации проведен анализ известных критериев прочности применительно к углерод углеродным и полимерным композитам. Разработан метод идентификации параметров модели и критериев статической и циклической прочности ПКМ по ограниченному набору экспериментальных данных. Разработан и экспериментально проверен критерий статической и циклической прочности полимерных композиционных материалов.

Практическая ценность

Конструкции и изделия из композиционных материалов широко применяются в различных отраслях машиностроения. При нагружении таких изделий напряжения могут превысить допустимые величины и привести к катастрофическим последствиям. Поэтому изучение способов укладки армировки позволяет найти те варианты, при которых напряжения в изделии распределены более или менее равномерно и не достигают предельных значений.

Достоверность

Научные положения, выводы и рекомендации диссертации являются достоверными, так как они подтверждаются проведением исследований с использованием современного испытательного оборудования и современных методов математического моделирования. Результаты исследований прошли экспериментальную верификацию путем сравнения с экспериментальными данными как полученными лично автором, так и из литературных источников, что подтверждает их достоверность.

Замечания

1. Во многих местах диссертационной работы используются индексные и буквенные обозначения компонент тензора деформаций и тензора напряжений, а также компонент тензоров модулей упругости и податливостей. Это обстоятельство затрудняет чтение и анализ результатов, представленных в диссертации.

2. На странице 45 вводятся коэффициенты $\eta_{x,xy}$; $\eta_{xy,x}$; $\eta_{y,xy}$; $\eta_{xy,y}$, которые называются коэффициентами связи деформаций. Далее нигде они не встречается. Нет пояснений о том что это такое и зачем оно нужно.

3. Нет пояснений о том как получены формулы (3.2.26) и (3.2.27).

4. В начале четвертой главы указывается, что «Под коэффициентом асимметрии r_{xx} принимается отношение минимального значения номинального напряжения образца при растяжении или сжатии к его минимальному значению.» Следовало бы привести формулу, по которой определяется коэффициент r_{xx} .

Заключение

В целом диссертация Воробьёва Игоря Андреевича выполнена на хорошем уровне, соответствующем ученой степени кандидата технических наук по специальности механика деформируемого тела.

1. Разработан метод оценки прочности армированных ПКМ *объединяющий в себе структурный подход к оценке напряженно-деформированного состояния и критерий прочности Хашина*, разделяющий

механизмы разрушения при растяжении и сжатии, армирующего волокна и матрицы материала.

2. Определен минимально необходимый объем экспериментальных данных, позволяющих идентифицировать параметры модели и критерия прочности.

3. *Предложено уточнение критерия Хашина*, позволяющее учесть влияние сдвиговых напряжений на предел прочности армирующего волокна при растяжении.

4. *Разработан критерий усталостной прочности ПКМ*, включающий аналитическое уравнение кривой усталости, связывающее количество циклов до разрушения с максимальным значением индикатора прочности в цикле.

По основным результатам диссертационной работы опубликовано 3 работы, из них 3 научно-технические статьи – в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (Перечень ВАК), и 1 из которых – в издании, индексируемом в базе Scopus.

Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации и полученные автором основные результаты.

Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Считаю, что диссертационная работа соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (п. 9), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а её автор Воробьёв Игорь Андреевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Доктор физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемых твердых тел, профессор, заведующий кафедрой «Механики композитов» Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

04 марта 2025 г.



Горбачев Владимир Иванович

Почтовый адрес: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, механико-математический факультет, кафедра механики композитов

Контактный телефон: +7(903)772-95-13

Адрес электронной почты: vigorby@mail.ru

Подпись д. ф.-м. н., профессора Горбачева В.И. удостоверяю:

Декан механико-математического факультета

Член-корреспондент АН, профессор



Шафаревич А.И.