

«УТВЕРЖДАЮ»

директор Института машиноведения  
им. А.А. Благонравова РАН

доктор технических наук, профессор

В.А. Глазунов

\_\_\_\_\_ 2020 г.



ОТ

**ведущей организации**

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук»  
на диссертационную работу

**Староверова Олега Александровича на тему**  
**«ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В**  
**УСЛОВИЯХ КОМПЛЕКСНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ»,**  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**Актуальность и степень разработанности темы исследования** определяется возрастающим объемом применения полимерных волокнистых композитов в ответственных силовых авиационных и космических конструкциях. В то же время, имеющихся экспериментальных результатов исследований материалов при комплексных термо-механических воздействиях (при комбинациях статических, ударных и циклических нагрузок) совершенно недостаточно для обоснованного построения уточненных определяющих соотношений, описывающих закономерности механического поведения композитов при сложных режимах эксплуатации.

Традиционные методики испытаний не позволяют получать опытные данные о процессах накопления повреждений в композитных материалах при комбинированных механических воздействиях.

В связи с этим вполне актуальной и своевременной выглядит поставленная задача развития комплекса экспериментальных методов исследования деформационных и прочностных свойств полимерных композитных материалов с использованием современного испытательного и диагностического оборудования для анализа полей деформаций и дефектоскопии.

**Целью диссертации** является разработка методов экспериментальных исследований и получение новых данных о закономерностях механического поведения слоисто-волокнистых и пространственно-армированных полимерных композиционных материалов при комплексных статических, циклических и

низкоскоростных ударных воздействиях в условиях нормальных и повышенных температур.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из **введения, четырех глав, заключения** и списка литературы, который содержит 168 наименований. Объем диссертационной работы составляет 140 страниц, в том числе, 97 рисунков, 3 таблицы. Структура диссертации и выводы отражают последовательность и результаты решения поставленных методических задач.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, а также положения, выносимые на защиту. Обоснованы научная новизна и практическая значимость работы.

**Первая глава** содержит анализ существующих экспериментальных методов квазистатических, циклических, динамических и комбинированных испытаний полимерных волокнистых композитов в условиях воздействия различных температур. Рассмотрены различные модели накопления повреждений в композитных материалах.

Во **второй главе** рассмотрены методические вопросы экспериментального исследования деформирования и разрушения полимерных композитных материалов при комплексных воздействиях различных видов механических нагрузок. Описаны испытательные установки, системы сбора данных и диагностическое оборудование.

На основе анализа стандартов в области испытаний полимерных композитов отмечено, что существующие стандарты не регламентируют испытания в условиях сложного нагружения.

Разработаны и описаны новые методики исследования механического поведения композитов в условиях комбинаций: 1. предварительного циклического нагружения или предварительного низкоскоростного удара с последующим квазистатическим воздействием; 2. предварительного низкоскоростного продольного удара и/или циклического растяжения или сжатия с дополнительными вибрационными воздействиями.

**Третья – центральная - глава** посвящена описанию процессов накопления повреждений в полимерных композитах с различной структурой армирования при последовательных циклических и статических воздействиях при комнатной и повышенных температурах. Для описания изменения прочностных свойств стеклопластиков при циклическом воздействии введена диаграмма усталостной чувствительности, на которой выделяются три участка: 1 - быстрого, начального накопления повреждений, 2 - установившегося состояния стабилизации усталостной чувствительности и 3 - резкого роста усталостной чувствительности, приводящего к окончательному разрушению. Анализ изменения скорости роста усталостной чувствительности позволяет диагностировать предкритическое состояние по аналогии с анализом интегральной энергии сигналов акустической эмиссии.

В **четвертой главе** приведены результаты исследования влияния динамических воздействий (ударов) с различной кинетической энергией на характеристики статической (остаточной) прочности и усталостной долговечности.

Оценка опасности низкоскоростного (непробивающего) удара (*LVI - low-velocity-impact*) представляет собой известную проблему обеспечения надежности проектирования углепластиковых панелей авиационного назначения, так как при поперечном ударе (например, при падении инструмента на обшивку крыла) могут возникнуть невидимые глазу расслоения, снижающие циклическую прочность конструкции при дальнейшей эксплуатации.

При исследовании влияния предварительного удара в плоскости укладки армирующих слоев стеклопластика обнаружено незначительное влияние удара на остаточную прочность при различных уровнях потенциальной энергии падающего груза. Напротив, поперечный удар может оказывать существенное влияние на остаточную и циклическую прочность, особенно, в условиях последующего сжатия или изгиба.

Проведено также исследование влияния предварительного низкоскоростного удара по схеме трехточечного изгиба на последующие процессы деформирования и разрушения стеклопластиков различной структуры.

**В Заключение** указаны основные научные результаты и выводы, полученные автором, связанные с:

- разработкой оригинальных методик испытаний композитных образцов при чередовании ударных, циклических и квазистатических нагружений;
- обоснованием нового способа описания экспериментальных данных по остаточной прочности в виде диаграммы усталостной чувствительности, имеющей три ярко выраженных участка;
- новыми данными по влиянию вибрационных воздействий на деформирование стеклопластиковых и углепластиковых образцов;
- исследованием влияния продольных и поперечных ударов с различной кинетической энергией на остаточную прочность и усталостную долговечность волокнистых композитов.

## **АНАЛИЗ СООТВЕТСТВИЯ ТРЕБОВАНИЯМ ВАК РФ**

**Научная новизна и значимость полученных результатов** связана с разработкой оригинальных методик испытаний современных полимерных слоисто-волокнистых и пространственно-армированных композитов при комплексных статических, ударных и циклических воздействиях с использованием диагностических систем инфракрасного термосканирования.

При циклических воздействиях предложен новый вид описания опытных данных в виде диаграмм усталостной чувствительности.

Выявлены закономерности воздействия вибраций на процессы деформирования и разрушения стеклопластиковых стержневых и углепластиковых трубчатых композитных образцов.

Получены оригинальные экспериментальные данные по влиянию поперечного и продольного удара на остаточную прочность и усталостную долговечность слоистых стеклопластиков.

**Достоверность полученных результатов** определяется грамотным и корректным использованием аттестованного оборудования и поверенных средств измерений в аккредитованной испытательной лаборатории и подтверждается

соответствием полученных результатов известным данным других авторов для некоторых режимов нагружения.

**Практическая ценность работы** заключается в возможности использования новых экспериментальных данных о механическом поведении и свойствах полимерных композиционных материалов в научно-исследовательских институтах и конструкторских бюро, таких как: ОАО «Авиадвигатель», АО «УНИИКМ», ОАО Пермский завод «Машиностроитель», ПАО «НПО Искра», АО «Композит» и на других предприятиях аэрокосмической и машиностроительной отраслей при проектировании конструкций из композиционных материалов с требуемым комплексом физико-механических свойств, а также в высших учебных заведениях при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Прикладная механика», «Материаловедение и технология новых материалов», «Наноматериалы».

Некоторые результаты уже использованы на предприятии ПАО «ОДК Сатурн» и в учебном процессе на кафедре «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» в Пермском национальном политехническом университете, что подтверждается актами об использовании результатов.

**Оценка диссертации.** Диссертация написана грамотным языком и хорошо проиллюстрирована схемами и графиками.

На основе изучения содержания диссертации и её обсуждения на заседании научно-технического совета были сформулированы некоторые предложения и замечания.

1. В основном выводы представляют отчет о проделанной работе. Новые экспериментальные данные должны по замыслу автора способствовать модификации определяющих соотношений и созданию новых моделей накопления повреждений, но этим вопросам в диссертации не уделено должного внимания.
2. Кроме прямого описания результатов следовало бы попытаться объяснить, какие свойства композитов влияют на особенности их поведения при комплексных воздействиях, например, путем сравнения контрастно различных по модулю упругости стекло- и углепластиков.
3. Названные в работе автора «диаграммы усталостной чувствительности» (рис. 3.6, 3.12 и др.), обычно называемые кривыми остаточной прочности, характеризующие процессы накопления повреждений, следовало бы не просто представить и описать, но проанализировать возможности их использования для диагностики приближения к критическим состояниям.
4. Основные экспериментальные результаты получены в условиях одноосного нагружения. Вместе с тем, многие критически важные конструкционные элементы эксплуатируются в условиях двухосного нагружения.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации, которая представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, удовлетворяющую основным требованиям ВАК РФ. Автореферат диссертации правильно и полно отражает ее содержание. Основные результаты диссертации

изложены в научных статьях и доложены на конференциях и семинарах.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа **Староверова Олега Александровича**, в которой на современном научно-методическом уровне решается задача создания новых методик комплексных испытаний полимерных композитов, удовлетворяет критериям Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела за исследование деформирования и разрушения полимерных композитных материалов в условиях комплексных механических воздействий.

Работа обсуждена и одобрена на заочном заседании Научно-технического совета отдела «Прочность, живучесть и безопасность машин» Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН 28 октября 2020 г. Протокол № 5/20.

Председатель Научно-технического совета,  
заведующий отделом «Прочность, живучесть  
и безопасность машин» ИМАШ РАН,  
101000, Москва, Малый Харитоньевский  
переулок, д. 4

доктор технических наук (01.02.06 -  
Динамика, прочность машин, приборов и  
аппаратуры), профессор,  
Заслуженный деятель науки РФ  
+7 (499) 135-12-04,  
ygmtvienko@gmail.com

Матвиенко  
Юрий Григорьевич

Ученый секретарь Научно-технического  
совета, научный сотрудник отдела  
«Прочность, живучесть и безопасность  
машин» ИМАШ РАН, кандидат технических  
наук (05.11.13 – Приборы и методы контроля  
природной среды, веществ, материалов и  
изделий)

+7 (499) 135-52-11, chernovdv@inbox.ru

Чернов  
Дмитрий Витальевич

Подписи Ю.Г. Матвиенко и Д.В. Чернова

заверяю



*Ю.Г. Матвиенко*