

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и инновациям

СГТУ имени Гагарина Ю.А.

член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор

А.А. Сытник

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию

Бабайцева Арсения Владимировича на тему «Моделирование напряженно-деформированного состояния толстостенных композитных конструкций, работающих в условиях динамического нагружения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04– «Механика деформируемого твердого тела»

Актуальность темы и цель диссертационной работы. Несмотря на то, что композитные материалы применяются достаточно давно, область применения данных материалов с каждым годом увеличивается. Например, конструкции, работающие в условиях высокоскоростного нагружения изготавливаемые ранее из металлов, не позволяют существенно увеличить скорости, из-за массовых и прочностных характеристик. Использование композитных материалов напротив позволяет существенно повысить удельную прочность и жесткость материала при этом существенно снизить удельную массу конструкции. Однако расчет подобных конструкций со сложной геометрией представляет собой непростую задачу. Поэтому для подобных расчетов толстостенных и трехмерных композитных изделий применяются в основном методы численного моделирования. Но использование численных методов крайне трудоемко и в ряде случаев может привести к неадекватному результату. В связи с этим, наличие хотя бы приближенного аналитического решения является крайне желательным. Поэтому одной из задач диссертационной работы является разработка аналитических методов для прочностного расчета составной

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № _____
26 12 2019 г.

осесимметричной протяженной конструкции переменного поперечного сечения. Свойства материалов при высокоскоростном нагружении могут существенно отличаться от статических свойств, что потребовало проведения, в рамках диссертации, экспериментального исследования материалов при статическом и высокоскоростном нагружении. Проведены исследования влияния кривизны волокон, а также скорость нагружения на прочностные характеристики композитного материала. Обобщая сказанное выше, следует признать выбранную тему исследования актуальной, научно и практически важной.

Основной целью диссертационной работы является исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) поведения толстостенных композитных конструкций, работающих в условиях динамического нагружения. Для достижения поставленной цели была решена задача аналитического определения НДС толстостенной составной конструкции в форме составных цилиндров и конусов, а также влияние незначительного изменения геометрии отсека на НДС рассматриваемой конструкции. Выполнено исследование влияния скорости нагружения на механические свойства композитных материалов в зависимости от направления укладки, а также влияние кривизны волокон. Проведено численное исследование влияния укладки исследуемой конструкции при динамическом нагружении с учетом прогрессирующего разрушения.

Научная новизна. В работе разработаны новые аналитические методы расчета составных осесимметричных композитных конструкций. Рассматриваются составные конструкции, состоящие из металлического сердечника и ведущего устройства со сложной геометрией из объемно армированного композитного материала. Первый метод является модификацией известной методики расчета, применявшейся ранее только для проектирования заднего скоса изделия, а не для конструкции целиком. Во втором методе помимо решения одномерной задачи о продольных деформациях решается задача об обжатии композитного стержня в рамках

обобщённой плоской деформации. Этот метод также является новым и, как показано в диссертационной работе, уточняет оценки первого метода.

В диссертационной работе проведено новое экспериментальное исследование влияния скорости нагружения на прочность композитных материалов. Исследовались квазиоднородные слоистые композиты с однонаправленной схемой армирования. Впервые проведено экспериментальное исследование влияния эффектов искривления волокон при статическом и динамическом нагружении на однонаправленных композитах с волнообразной слоистой структурой.

Реализованы детализированные динамические численные конечно элементные (КЭ) расчеты для изделий с ведущими устройствами, выполняемыми из трехмерно- армированных материалов и из слоистых композитов. В том числе с использованием моделей прогрессирующего разрушения, исследовано влияние схемы армирования на его прочность и характер развития дефектов.

Достоверность. При разработке аналитических методов расчета составных осесимметричных композитных конструкций применялись известные методы механики деформируемого твердого тела, теории упругости, механики композиционных материалов, теории дифференциальных уравнений. Каждый результат, полученный в процессе разработки аналитических методов расчета, сопоставлялся с численным расчетом и показал хорошую корреляцию. При экспериментальных исследованиях использовались стандартные апробированные методики с учетом известных исследовательских работ. Детализированные динамические численные КЭ расчеты проводились с пошаговым усложнением и варьированием конечно элементной сетки для проверки их достоверности.

По структуре рецензируемая диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы, состоящего из 97 источников, и изложена на 130 страницах.

Во введении формулируются цели и задачи диссертационной работы,

кратко рассмотрено основное содержание глав, указаны результаты, выносимые на защиту.

Первая глава содержит современное состояние проблемы. Дан литературный обзор с учетом существующих аналитических и численных методов расчета толстостенных составных осесимметричных конструкций, влияние высокоскоростного нагружения на механические свойства композитных материалов, а также способы их исследований. На основе проведенного патентного исследования подобных конструкций заданы основные направления исследования с существующими критериями прочности.

Вторая глава содержит постановку задачи и изложение двух методов расчета, которые с различной степенью приближения позволяют получать быстрые оценки НДС рассматриваемых конструкций. Первый метод, основанный известном методе расчета одного сегмента конструкции, был адаптирован для конструкции в целом. Во втором предложенном аналитическом методе рассматривается декомпозиция напряженного состояния изделия: решается одномерная задача о продольных деформациях составного стержня, для которого вводится эффективный модуль упругости, и решается задача об обжатии композитного стержня в рамках обобщенной плоской деформации. Этот метод также является новым и, как показано в первой главе, уточняет оценки первого метода. Оба предложенных метода к оценке прочности изделия сопоставлены с численным моделированием. Показаны возможность и ограничения применимости этих методик для проведения практических расчетов.

Достоинством второго метода является более аккуратный учет эффектов обжатия конструкции с учетом концентрации напряжений на границе контакта ведущего устройства с сердечником. Метод представляется в главе пошагово, сначала для одиночных сегментов в виде цилиндра и конуса без и с учетом обжатия, а затем для составных конструкций. Следует отметить перспективность второго метода для дальнейшего развития аналитических

методов проектирования рассматриваемых изделий – например, его можно обобщить на случай учета значительной конусности изделия.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию композитного материала при действии высокоскоростного нагружения. В работе исследовались два типа композитных материалов: квази-однородного слоистого композита с однонаправленной схемой армирования и однонаправленного композита с волнообразной слоистой структурой. Для каждого образца были получены характерные диаграммы нагрузка-перемещение и напряжения-деформации, а также определены характеристики прочности, в том числе, исследовано влияние эффекта искривления волокон. Результаты статических испытаний представлены в разделе 3.1, а динамические, высокоскоростные испытания, представлены в разделе 3.2.

На основе проведенных экспериментальных исследований определены, с использованием метода Кольского, высокоскоростные характеристики композиционного слоистого материала. Анализ экспериментальных исследований дан в разделе 3.3. Впервые исследован характер влияния искривления волокон (может возникать, как технологические дефекты в толстостенной конструкции, или вследствие особенностей армирования) на высокоскоростную прочность и предельные деформации образцов эпоксиуглепластика. Показано, что в проектировочных расчетах для рассматриваемых изделий, в принципе, возможно использование статических характеристик, так как повышение скорости испытаний приводит к повышению прочности и, следовательно, результаты расчетов будут обеспечивать дополнительный запас прочности. Искривление же волокон приводит к снижению прочности и повышению предельных деформаций материала, что требуется учитывать для корректного проведения численных расчетов.

Четвертая глава содержит детализированные численные расчеты для изделий с ведущими устройствами, выполняемыми из трехмерно-армированных материалов и слоистых композитов. С использованием

моделей прогрессирующего разрушения, исследовано влияние схемы армирования на его прочность и характер развития дефектов. Показано, что наиболее оптимальной схемой трехмерного армирования является радиальная схема, обеспечивающая снижение концентрации напряжений в конструкции и замедляющая распространение дефектов. Представлено влияние изменения модуля упругости на максимальные напряжения для каждого варианта укладки. Для слоистых композитов показано, что предпочтительным является изготовление изделий, набираемых из большого числа тонких сегментов, в которых снижается уровень наиболее опасных касательных напряжений и напряжений, приводящих к срезу резьбового соединения на границе контакта ведущего устройства и сердечника. Опасным местом, требующим дополнительных конструктивных решений и упрочнения, в тонких секторах является область заднего кольца ведущего устройства вблизи внешней поверхности, где может происходить разрушение по механизму поперечного растрескивания в матрице.

Результаты, полученные в диссертационном исследовании, обобщены и представлены в **заключении**. Кроме этого, основные результаты по каждому разделу работы, кратко изложены в конце соответствующего раздела.

Диссертация и ее автореферат изложены хорошим научно-техническим языком. Автореферат диссертации отражает основное содержание диссертационного исследования и его результаты.

Замечания по диссертации и автореферату.

1. В автореферате применено сокращение ВУ, однако его расшифровка не приведена, она есть только в тексте диссертации.

2. На стр. 27 после формулы (2.1.1) (автореферат - на стр. 7, после формулы (1)) приведена формула без номера, в пояснении к которой присутствует, ρ_c - плотность материала стержня, однако в самой формуле данной плотности нет, в то же время в формуле (2.1.4) (автореферат - формула (3)) данная плотность есть, а в описании входящих в нее членов данная плотность отсутствует.

3. Из текста не ясно, проводился ли аэродинамический расчет поля давления в задней части изделия, находящегося в полете, или оно считается наперед заданным.

4. Из рис. 2.2 диссертации (рис.1 в автореферате) не совсем ясно, где находится область резбового контакта с ведущим устройством (ВУ).

5. На графиках, представленных на рис. 2.10 (рис. 4 автореферата) отсутствуют обозначения координатных осей, что затрудняет их восприятие. Также нет указаний, для какого материала приведены данные расчетов.

6. На рис. 2.4 (рис. 2 в автореферате) плотности фрагмента сечения оболочки и стержня обозначены как одинаковые, однако, как следует из текста, данные плотности разные.

7. В уравнениях (2.2.2), записанных для случая осевой симметрии почему-то удержан член $\sigma_{\theta\theta}$ (хотя ранее в тексте он полагается равным нулю).

8. На графике, представленном на рис. 3.7. отсутствуют обозначения осей координат и их размерность.

9. На рис. 3.8 передающий стержень, образец и приемный стержень представлены как единое целое, что искажает восприятия схемы метода Кольского.


Указанные замечания носят уточняющий и редакционный характер и не снижают общего высокого уровня диссертационного исследования и полученных результатов.


Заключение. Рассмотренная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-техническая проблема механики деформируемого твердого тела. Новизна полученных результатов, их достоверность и практическое значение сомнений не вызывает. В 9 научных публикациях автора достаточно подробно изложено содержание диссертационного исследования. Среди опубликованных работ: 1 в научном издании, индексируемом в Scopus и 4 работы в журналах, рекомендуемых ВАК. Оценивая работу в целом необходимо отметить, что она удовлетворяет пунктам 9-11, 13, 14 Положения «О порядке

присуждения учёных степеней», а ее автор, Бабайцев А.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04– «Механика деформируемого твердого тела».

Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен 25 ноября 2019 года на семинаре кафедры «Прикладная математика и системный анализ» СГТУ имени Гагарина Ю. А.

Отзыв составили:

Профессор, д.т.н., профессор кафедры «Прикладная математика и системный анализ» СГТУ имени Гагарина Ю. А.  Попов В.С.

Заведующий кафедрой «Прикладная математика и системный анализ» СГТУ имени Гагарина Ю. А.
д.ф.-м.н., профессор  Землянухин А. И.

Контактные данные организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Телефон:8(452) 998811

E-mail: sstu_office@sstu.ru

Официальный сайт: <http://www.sstu.ru/>

Подписи Землянухина А.И., Попова В.С. заверено

