

«УТВЕРЖАЮ»

Проректор по науке и инновациям

С. Г. Сытник 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 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.

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.

Обобщая сказанное выше, следует признать выбранную тему диссертационного исследования актуальной, научно и практически важной.

**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 постановки обобщённой плоской деформации. Этот метод также является новым и, как показано в диссертации, 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 сеткой для проверки их достоверности.

По **структуре** рецензируемая диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы, состоящего из 97 ссылок, 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 проведённого 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 на 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 обобщённой 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. Показана возможность и ограничения по 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 динамические численные расчеты для изделий с ведущими устройствами, выполняемыми из трехмерно- армированных материалов и из 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, требующем 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. На стр. 27 после формулы (2.1.1) (автореферат - на стр. 7, после формулы (1)) приведена формула без номера, в пояснении к которой присутствует,  $\rho_c$  - плотность материала стержня, однако в самой формуле данной плотности нет, в тоже время в формуле (2.1.4) (автореферат - формула (3)) данная плотность есть, а в описании входящих в нее членов данная плотность отсутствует.

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

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



4. 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.

5. 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.

6. 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).

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

8. 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 10 научных публикациях автора достаточно подробно изложено содержание диссертационного исследования. Среди опубликованных работ: 2 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 08 июня 2020 года на заседании кафедры «Прикладная математика и системный анализ» СГТУ имени Гагарина Ю. А. протокол №10.

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](mailto:sstu_office@sstu.ru)

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