

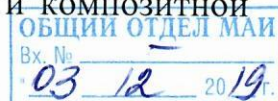
## О Т З Ы В

официального оппонента Сарбаева Б. С.  
о диссертационной работе Бабайцева А.В. 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 твёрдого тела

К композитным изделиям в виде тел вращения можно отнести толстостенные трубы высокого давления, вкладыши сопел реактивных двигателей на твёрдом топливе, валопроводы, наконечники головных частей летательных аппаратов и пр. При разработке таких изделий для выполнения проектного расчета полезно иметь относительно простые расчетные соотношения. Такие соотношения могут быть получены на основе адекватных математических моделей, экспериментальных исследований физико-механических характеристик применяемых композиционных материалов (КМ) как при двумерном, так и при трехмерном напряженных состояниях. Задача усложняется, если помимо статических нагрузок рассматриваются и динамические. Именно такой комплексный подход к разработке композитных тел вращения, включающий теоретические и экспериментальные исследования, и предлагается в данной работе. В этой связи тема диссертации представляется актуальной.

Диссертация состоит из четырёх глав. Первая глава представляет собой обзор отечественных и зарубежных публикаций, посвященных разработке одного варианта толстостенного тела вращения, изготовленного с применением КМ. В ней описываются устройство и технология изготовления исследуемой композитной конструкции; способы её расчета, в том числе с применением современного программного обеспечения; методы экспериментального исследования физико-механических характеристик КМ при статическом и динамическом нагружениях. В обзоре выделены публикации, в которых исследуется влияние искривления волокон на жесткостные и прочностные характеристики волокнистых КМ. В главе также представлен краткий патентный обзор.

Во второй главе, занимающей центральное место в рукописи диссертации, представлены варианты расчетных схем композитной конструкции в виде тела вращения при статическом нагружении. В простейшей схеме («нулевое приближение») конструкция рассматривается как абсолютно твёрдое тело. Из уравнения движения удаётся получить формулу для расчета средних касательных напряжений на границе «металл-композит». В другом варианте расчётной схемы предполагается, что в теле действуют только нормальные напряжения, распределённые равномерно по сечению, контакт между металлической и композитной





частями идеальный. Радиус поперечного сечения изменяется по длине изделия, что обусловлено наличием конических поверхностей. За счет этого получаются переменные по осевой координате значения нормальных напряжений в композитных и металлических частях и касательных напряжений на границе контакта «металл-композит».

Далее по существу решение линейной задачи о расчете тела вращения при осесимметричной нагрузке рассматривается как суперпозиция решений двух задач. В первом случае решается задача о напряженно-деформированном состоянии тела при действии осевой внешней нагрузки, обусловленной силами инерции и осевой составляющей внешнего давления. Во втором случае рассматривается задача о действии внешнего давления на тело вращения. В обоих случаях КМ рассматривается как квазиизотропный материал, податливость резьбового слоя не учитывается. В итоге были получены обзримые аналитические решения, которые предлагается использовать в проектных расчетах. На их основе выполнен параметрический анализ напряженно-деформированного состояния тела вращения при статическом нагружении. Выполнено сопоставление аналитических и численных решений, полученных с помощью современного программного обеспечения. Сформулированы рекомендации по совершенствованию конструкции.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию физико-механических характеристик углепластика при статическом и высокоскоростном нагружении. Основное внимание уделено определению пределов прочности и предельных деформаций материала при сжатии. Описана методика проведения опытов. Изучается влияние искривления волокон на указанные параметры. Результаты представлены в виде диаграмм деформирования и таблиц. Показано, что предел прочности при сжатии, определенный в опытах при высокоскоростном нагружении, превышает предел прочности при сжатии в случае статического нагружения. Отмечено также снижение пределов прочности для образцов с искривленными волокнами по сравнению с образцами с прямыми волокнами.

В четвертой главе приведены результаты численного анализ напряженного состояния конструкции при динамическом нагружении, полученные с помощью известного программного комплекса ANSYS. Рассматриваются варианты конструкции с различными схемами армирования. Для них проведен сравнительный анализ напряжений в композитной и металлических частях конструкции. Исследуется влияние модуля упругости материала, накопления повреждений в его структуре на напряженное состояние конструкции. По результатам расчёта формулируются рекомендации по совершенствованию её прочности.

Текст диссертации заканчивается формулировкой выводов.



По мнению оппонента, к новым научным результатам, полученным А.В.Бабайцевым, можно отнести следующее:

- комплексную методику расчета и проектирования композитных тел вращения при осесимметричном нагружении, включающую: а) разработку обзорных аналитических соотношений для проектного расчета; б) экспериментальное исследование применяемых КМ при статическом нагружении и высокоскоростном ударе; в) поверочный расчет конструкции при динамическом нагружении на основе метода конечных элементов с применением современных программных средств;

- результаты экспериментального исследования КМ на основе углеродных волокон при статическом нагружении и высокоскоростном ударе, указывающие на влияние характера нагружения образцов материала, способа укладки волокон на физико-механические характеристики.

Полученные результаты представляются достоверными, поскольку они получены на основе соотношений классической теории упругости, апробированных методик экспериментального исследования, алгоритмов и вычислительных программ.

Практическое значение могут иметь следующие разработки диссертанта:

- аналитические зависимости для проведения проектного расчета композитных тел вращения при осесимметричном нагружении;

- результаты экспериментального исследования физико-механических характеристик КМ на основе углеродных волокон при статическом нагружении и высокоскоростном ударе;

- методика расчета композитных тел вращения при динамическом нагружении на основе метода конечных элементов с применением современных программных средств.

Основные результаты диссертации могут быть востребованы исследовательскими организациями и конструкторскими бюро, занимающихся разработкой элементов конструкций из КМ.

По мнению оппонента, в диссертационной работе А.В.Бабайцева имеются недостатки. Отметим основные из них.

1. Приступая к решению сформулированных в диссертации задач, полезно ознакомиться с классическими решениями, относящихся к расчету анизотропных круговых цилиндров (см. Лехницкий С.Г. «Теория упругости анизотропного тела», М.: «Наука», 1977 г.), а также с работами, посвященными расчёту толстостенных композитных труб (см. Тарнопольский Ю.М., Бейль А.И. «Толстостенные трубы и кольца из композитов» в кн. «Композиционные материалы. Справочник» под ред. Васильева В.В. и Тарнопольского Ю.М. М.: «Машиностроение», 1990 г.). По этой причине считаю обзор литературы по теме диссертации



недостаточно полным. Кроме этого, в завершающей части обзорной главы хотелось бы видеть формулировку целей и задач диссертационной работы.

2. Расчетная модель, предложенная в разделе 2.1, перегружена упрощениями. Например, предполагается, что КМ является квазиизотропным материалом (см. табл.2.1 на стр.25). При этом не указывается, является ли композит намоточным углепластиком или углерод-углеродным композитом. Несмотря на то, что в обзорной главе 1 подчёркивается важность обеспечения прочности резьбового соединения и анализа концентрации касательных напряжений на границе «металл-композит», в предлагаемой расчетной схеме не учитывается податливость резьбового слоя. Следует заметить, что в рамках одномерного подхода при осевом нагружении это сделать несложно. Такой подход приводил бы к более достоверным значениям касательных напряжений в области контакта «металл-композит». В частности, он позволил бы описать концентрацию касательных напряжений по краям тела, а также в сечениях, где стыкуются цилиндрические и конические части.

3. Глава 4 выглядела бы весомей, если бы в ней было дано подробное описание расчетной схемы и результатов расчёта, а именно: аналитическая формулировка граничных условий и условий симметрии; способ, с помощью которого описывается деградация характеристик упругости КМ вследствие накопления повреждений в структуре материала («прогрессирующее разрушение» по терминологии диссертанта); момент времени, для которого указаны напряжения на рисунках. Следует также отметить, что варианты конструкций, изображенные на рис.4.2а,б, не являются осесимметричными. Поэтому применение сектора с углом  $120^\circ$  для анализа напряжений является необоснованным.

4. Диссертация оформлена недостаточно аккуратно. Например, в некоторых предложениях, где запятое не нужно, они проставляются в избытке, и наоборот: там, где запятые требуются, они отсутствуют (см. стр.28, 31, 73 и пр.). В тексте имеются опечатки. Например, на стр.30 в последнем абзаце вместо ссылки на формулу (2.1.3) следует сослаться на (2.1.5); на стр.54 в формуле (2.2.34) величина, имеющая размерность напряжения, складывается с безразмерной величиной; на стр.46 ссылка на работу [48] явно неуместна. Можно приводить и другие примеры. Особо следует отметить небрежное отношение к применению обозначений обыкновенной и частной производных. Показательны в этом смысле формулы 2.2.4 на стр.45, где должны фигурировать частные производные, и (2.2.26) на стр.53, в которых необходимо использовать обыкновенные производные. Эти досадные неточности оформления в целом не влияют на итоговую оценку значимости полученных результатов, однако они затрудняют чтение текста и не лучшим образом влияют на восприятие диссертации в целом.

Подводя итог, можно заключить, что диссертационная работа А.В.Бабайцева является законченной научно-квалификационной работой. В ней



выполнен значительный объем теоретических и экспериментальных исследований композитных толстостенных конструкций. Предложены научно обоснованные технические решения, имеющие существенное значение для развития отраслей промышленности, связанных с производством изделий из современных КМ.

Таким образом, настоящая диссертация удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям. Ее автор, Бабайцев Арсений Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Официальный оппонент  
доктор технических наук,  
профессор



Б.С.Сарбаев

Подпись Б.С.Сарбаева заверяю



А. Т. МАТВЕЕВ

НАЧ. УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ

ТЕЛ 8499-263-67-69

Официальный оппонент  
Сарбаев Борис Сафиулович,  
доктор технических наук, профессор кафедры  
"Космические аппараты и ракеты-носители"  
МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Адрес места работы:

г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

E-mail: [bssarbayev@mail.ru](mailto:bssarbayev@mail.ru)

Специальность ВАК, по которой защищена диссертация – 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела»