

# О Т З Ы В

## официального оппонента

на диссертационную работу Безмельницына Александра Викторовича

### «ОЦЕНКИ ЖЁСТКОСТИ И ПРОЧНОСТИ ВТУЛОК ОПОРНЫХ УЗЛОВ ДОРОЖНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ МНОГОМАСШТАБНЫХ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ПОРИСТОГО ТКАНЕВОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

В рецензируемой работе проводится комплексное исследование возможности замены бронзовых втулок опорных узлов дорожных машин на композитные втулки, изготовленные из тканевого стеклопластика. Стеклопластиковые втулки имеют ряд преимуществ перед бронзовыми: обладают меньшей стоимостью, требуют меньшей механической обработки, обеспечивают меньший износ вала и общий рост долговечности опорного узла. Указанные обстоятельства обуславливают актуальность темы диссертации.

Целью диссертационного исследования является разработка экспериментальных методов и многомасштабных численных моделей для определения эффективных тепло-физических свойств композитных структур с открытой пористостью; изучение межслойных технологических напряжений, образующихся при изготовлении деталей; оценка несущей способности втулок из тканевых композитов при действии эксплуатационных нагрузок.

**Оценка содержания диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Работа содержит 78 рисунков, 6 таблиц. Общий объем диссертационной работы составляет 116 страниц, список литературы включает 162 источника.

**Во введении** обосновывается актуальность проводимого исследования. Приводятся публикации, посвященные исследованию свойств конструкционных волокнистых и тканевых композитов. В частности, указывается на недостаточность исследований эффективных материальных свойств тканевых композитов с открытой пористостью. Формулируется цель исследования, указываются решаемые в диссертации задачи. Отмечаются достигнутые в работе результаты, выносимые на защиту, их научная новизна, практическая ценность и достоверность. Введение заканчивается сведениями о публикациях по теме исследования и выступлениях на конференциях и семинарах.

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору публикаций по теме диссертации. Здесь приводятся материальные характеристики элементов структуры композиционных материалов, используемых для изготовления втулок в опорах скольжения различных механизмов, указываются их отечественные и зарубежные производители. Описываются различные технологии изготовления

композитных втулок и подшипников скольжения методом намотки. Анализируются причины возникновения способствующих расслоению остаточных напряжений в массивных цилиндрических деталях. Рассмотрены способы экспериментального определения остаточных напряжений в кольцевых массивных изделиях из композитов. Обсуждаются численные методы определения жесткостных и прочностных материальных характеристик на каждом уровне двухуровневых тканевых композитов на основе гипотезы периодической структуры. На основании проведенного аналитического обзора формулируются задачи исследования: провести экспериментальные исследования микроструктуры полученных намоткой втулок из тканевых композитов с открытой пористостью (КОП); с использованием гипотезы периодической структуры разработать метод вычисления упругих и теплофизических характеристик тканевых КОП; исследовать остаточные межслойные технологические напряжения в цилиндрических втулках из тканевого композита; разработать методику оценки несущей способности втулок из тканевых композитов в условиях эксплуатации.

**Во второй главе** автор с использованием оригинальных методов проводит серию экспериментальных исследований, предназначенных для верификации разрабатываемых автором моделей. Определяет распределение по толщине втулки модуля упругости в окружном направлении, теплофизических характеристик, плотности, объемных долей стеклянных волокон, полимерной матрицы и пор (пустот). Двумя способами проводит исследование прочности в трансверсальном направлении втулки из КОП. При помощи динамического механического анализатора (ДМА) определена температура стеклования связующего.

**Третья глава** посвящена изучению упругих и теплофизических характеристик тканевых композитов и разработке метода оценки технологических остаточных напряжений в толстостенных втулках из таких материалов. Глава состоит из четырех пунктов. В п.3.1 с использованием допущения о периодичности структуры предлагается метод построения эффективных физико-механических характеристик однонаправленно армированного непрерывными волокнами композита. Результаты вычисления конкретной композиции сравниваются с аналитическими решениями. В п.3.2 предлагается способ вычисления приведенных характеристик тканевой композиции, структурными элементами которой являются однонаправленно армированный материал и полимерная матрица. Используется методика, предложенная в п.3.1. Из композитного слоя выделяется периодическая ячейка, постулируется, что ее материальные характеристики удовлетворяют условиям ортотропного тела. Эффективные свойства находятся численно с использованием программного пакета ANSYS. Конкретные вычисления проводятся для внутреннего и внешнего слоев втулки. Считается, что свойства остальных слоев непрерывно и линейно распределены между ними. В п.3.3 проводится оценка трансверсальных остаточных напряжений, возникающих в изучаемой конструкции в результате технологического процесса. При численном решении задачи об образовании остаточных напряжений композитной втулки, изготовленной способом намотки, в качестве естественного (ненапряженного и недеформированного) считается состояние детали в момент начала ее охлаждения

до температуры стеклования полимерной матрицы. Используются найденные в предыдущих главах физико-механические характеристики композиций. Показывается, что вследствие охлаждения втулки до комнатной температуры в ней возникают положительные радиальные напряжения, способствующие ее расслоению. В п.3.4 оценивается напряженное состояние втулки из композита под действием сосредоточенной радиальной растягивающей нагрузки. Численное решение этой задачи сравнивается с результатами экспериментального исследования, приведенного в главе 2. Обсуждается расхождение между предельными значениями трансверсальных напряжений в экспериментальном исследовании и численном решении. Это расхождение автор объясняет наличием остаточных напряжений.

**В четвертой главе** проводится сравнительная оценка несущей способности втулок опорного катка гусеничного движителя трубоукладчика, изготовленных из бронзы и композита. Глава включает четыре пункта. В п.4.1 экспериментально определяется коэффициент трения при скольжении композитной втулки относительно вала. Трансверсальный модуль упругости и предел прочности композитной втулки определяются экспериментально в п.4.2. В п.4.3 предлагается расчетно-экспериментальный метод определения сдвиговой прочности. С использованием предельной нагрузки, найденной экспериментально, численно определяются критические межслойные касательные напряжения. В п.4.4 расчетным путем оценивается несущая способность рассматриваемой втулки, изготовленной из бронзы и тканевого композита. Задача решается методом конечных элементов в трехмерной постановке. Показывается, что втулка из композита менее нагружена за счет большей площади контакта с валом и допускает больший наработанный зазор.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в работе.

**Основными научными результатами**, полученными в работе, являются:

- впервые для втулок из тканевых КОП, полученных намоткой экспериментально определено распределение по толщине окружных модулей упругости, теплофизических свойств, плотности и объемных долей матрицы, стекловолокон и пор;
- с использованием гипотезы периодической структуры разработан метод вычисления упругих и теплофизических характеристик тканевых композитов;
- исследованы остаточные межслойные технологические напряжения в цилиндрических втулках из тканевого композита при допущении, что их причиной является различие теплофизических характеристик по толщине материала;
- с использованием критерия прочности Дэниэла предложена методика оценки несущей способности втулок из тканевых композитов в условиях эксплуатации.

**Новыми**, по мнению рецензента, являются следующие результаты:

- проведены экспериментальные исследования объемных долей пор, компонентов микроструктуры, коэффициентов линейного температурного расширения по толщине втулки из КОП;
- предложены два способа определения прочности в трансверсальном направлении;
- с использованием допущений о периодичности структуры и ортотропности свойств материала предложена методика и определены физико-механические характеристики тканевого композита;
- опираясь на критерий оценки несущей способности слоистых композитов Дэниэла, автор предложил экспериментально-численный метод определения параметров этого критерия применительно к композитной втулке (трансверсальная прочность (сжатие-растяжение), прочность на сдвиг, жесткостные макроскопические характеристики). Показано, что основной разрушающей нагрузкой для втулки является трансверсальное сжатие. Проведена оценка прочности композитной втулки конкретного механизма.

#### **Достоверность, степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации**

Достоверность экспериментальных результатов, полученных в работе, сомнений не вызывает, они выполнены с использованием стандартных методик на аттестованном испытательном оборудовании. Численные результаты получены с использованием сертифицированных программных средств, частично опираются на экспериментальные данные. Выводы диссертационной работы Безмельницына А.В. не противоречат данным, опубликованным в отечественных и зарубежных источниках.

#### **Теоретическая и практическая значимость полученных результатов**

Полученные в работе результаты расширяют наши знания о тканевых композитах, вследствие чего имеют теоретическое значение. Показанная автором возможность использования тканевых композитов для изготовления деталей машиностроительных конструкций свидетельствует о прикладной (практической) значимости работы.

#### **Соответствие автореферата основным положениям диссертации.**

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям ВАК РФ. Содержание автореферата в полной мере отражает структуру, основные результаты и выводы диссертации. Автореферат и диссертация изложены ясно, достаточно иллюстрированы, представляют экспериментальные исследования, разработанные расчетные модели и результаты численного анализа.

**Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати.** По теме диссертации опубликовано 6 работ, в том числе 4 статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень изданий, индексируемых в SCOPUS/Web of Science или рекомендованных ВАК.

## **Вопросы и замечания:**

### **К главе 1.**

1. В обзоре публикаций не отражены исследования по моделированию композиций материалов с хаотической структурой материалами с периодической структурой. Такое моделирование приводит к изменению структуры матриц жесткости и коэффициентов температурного расширения.
2. Не отражены публикации по гомогенизации композитов с периодической структурой.

### **К главе 2.**

1. Определение теплофизических параметров проводится на образцах, являющихся прямоугольными параллелепипедами, вырезанными из тела с предположительно цилиндрической анизотропией свойств. Главные оси анизотропии таких образцов не ортогональны образующим параллелепипед плоскостям. Поэтому при однородном тепловом нагружении образец исказится (не перейдет в прямоугольный параллелепипед). В работе не оценивается влияние этого фактора на результат измерения.
2. Аналогичное замечание касается испытания на прочность усилием в направлении радиуса цилиндра образцов в виде параллелепипедов, вырезанных из тела с цилиндрической анизотропией.

### **К главе 3.**

1. Численное определение эффективных характеристик (материальных параметров) проводится с использованием допущения о периодичности структуры материала (однонаправленно армированного пластика и слоя из тканевого композита). Осреднение уравнений микромеханики осуществляется на периодической ячейке. По мнению рецензента значения макроскопических параметров, полученные таким способом, в работе недостаточно обоснованы по следующим причинам:
  - 1) Эффективные свойства композитов, в том числе композитов с периодической структурой, определяются на образцах с характерным размером не меньше представительного объема.
  - 2) Для композитов с периодической структурой разработан метод асимптотического осреднения (Победря Б.Е.). На каждом шаге этого метода появляются эффективные модули соответствующего уровня. Модули, определяемые для периодической ячейки в данной работе, являются модулями нулевого уровня. Модули нулевого уровня не совпадают с эффективными модулями материала. Такое совпадение случается лишь в исключительных случаях, например, в одномерной задаче.

- 3) Выбор периодической ячейки в периодической структуре неоднозначен. Поэтому модуль нулевого уровня зависит от такого выбора.
  - 4) Выбранная автором периодическая ячейка для случая однонаправленного композита макроскопически не является трансверсально изотропным телом. Полученные значения модулей упругости нулевого уровня не являются свойствами трансверсально изотропного тела. Не выполняется условие в плоскости изотропии  $E = 2G(1 + \nu)$ , не согласуются численные значения жесткостей с приведенным аналитическим решением по коэффициенту Пуассона.
  - 5) Допускается, что периодическая ячейка тканевого композита обладает ортотропными макроскопическими свойствами. По мнению рецензента такое допущение требует обоснования. Ортотропный материал должен обладать двумя взаимно ортогональными плоскостями симметрии, но такие плоскости отсутствуют в выбранной ячейке.
2. При численном определении эффективных свойств материала не учитывается экспериментальное определенное в главе 2 наличие пористости композита.

#### **К главе 4.**

1. При конечно-элементном численном исследовании напряженно-деформированного состояния (НДС) композитной втулки характерный размер конечного элемента автором выбирается равным размеру периодической ячейки. По мнению рецензента при таком подходе автор выходит за пределы области достоверного описания НДС детали. Действительно, периодическая ячейка является элементарным объемом (точкой макроскопической среды). Такой объем при макроскопическом описании находится в однородном напряженно-деформированном состоянии. Считать, что параметры НДС изменяются внутри элементарного объема, представляется некорректным.
2. При численно-экспериментальном определении прочности на сдвиг (рис.4.8) этот предел лежит в диапазоне [-47; 260МПа]. Автор указывает значение 19,604Мпа. Почему?
3. Используемый для оценки прочности втулки критерий Дэниэла для слоистого композита в работе практически не описан. В частности, не приведены формулы, значения материальных констант, входящих в критерий. Не построена диаграмма Дэниэла для предельных значений сжимающих и сдвиговых напряжений, не обсуждена возможность применения критерия к тканевым композитам.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней.** Диссертационная работа А.В. Безмельницына представляет собой законченное научное исследование, в котором изложены новые научно обоснованные решения, имеющие значение

для развития транспортной отрасли. Диссертация соответствует паспорту специальности 01.02.04 и удовлетворяет критериям, установленным п.9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор – Безмельницын Александр Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».


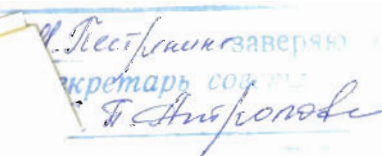
Официальный оппонент,  
доцент кафедры вычислительной и экспериментальной  
механики Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
"Пермский государственный национальный исследова-  
тельский университет", кандидат физико-математичес-  
ких наук (01.02.01), доцент

 Пестренин Валерий Михайлович

«18» мая 2021 г.

Адрес: 614990, г. Пермь,  
ул. Букирева, дом 15,  
Адрес эл. почты: pestreninvm@mail.ru  
Раб. телефон: +7 (342) 239-63-78

Я, Пестренин Валерий Михайлович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой Диссертационного Совета и их дальнейшую обработку.

  
  
М. Пестренин заверяю  
секретарь совета  
И. А. [Signature]