

## ОТЗЫВ

**официального оппонента д.т.н. Аношкина Александра Николаевича на диссертационную работу Шакирова Александра Александровича "Повышение долговечности каркасно-панельных кузовов транспортных средств с макрогеометрическими отклонениями при помощи клеемеханических соединений с управляемой жесткостью", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.02 - "Машиноведение, системы приводов и детали машин"**

Диссертационная работа Шакирова А.А. посвящена разработке новых методов проектирования каркасно-панельных кузовов транспортных средств с композитными сэндвич панелями и клеемеханическими соединениями.

### **Актуальность темы исследования.**

В настоящее время каркасно-панельные кузова используются при создании наземных, морских и речных транспортных средств. Требования повышения их экономичности, надежности, экологической эффективности, снижения себестоимости изготовления обуславливают интерес к разработке новых концепций проектирования с использованием новых материалов. Трехслойные панели с использованием композиционных материалов обеспечивают снижение веса, повышение технологичности, высокие шумо- и теплоизоляционные свойства, а также дают возможность использования современных дизайнерских решений при создании перспективных транспортных средств.

При этом использование панелей из композиционных материалов в металлических каркасных конструкциях транспортных средств выдвигает на первый план проблему разработки методики проектирования комбинированных метало-композитных конструкций с обеспечением надежного и долговечного соединения композитных и металлических деталей. При этом необходимо использовать современные вычислительные методы и экспериментальные методики, позволяющие наиболее эффективно решить поставленную проблему.

Поэтому тема диссертационной работы по созданию новых моделей функционирования, оценке статической и циклической прочности, определению способов совершенствования клеемеханических соединений «композит-металл» и разработке новых методов проектирования каркасно-панельных конструкций транспортных средств является актуальной.

Диссертационная работа имеет объем 165 страниц, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературных источников на 191 наименование и трех приложений.

**В первой главе** диссертационной работы приведен обзор отечественной и зарубежной литературы по тематике исследования. Рассмотрены требования к конструкциям транспортных средств, концепции исполнения кузовов, перспективы использования в них композиционных материалов. Особое внимание уделено проблеме обеспечения прочного, надежного и долговечного соединения композиционных и металлических материалов в конструкции комбинированных метало-композитных кузовов транспортных средств. Проанализированы существующие виды, выявлены перспективные варианты соединений и направления их совершенствования для наиболее эффективного использования в конструкциях кузовов. Сформулированы цели и задачи исследования.

**Во второй главе** разработана новая методика проектирования и расчета каркасно-панельного кузова транспортного средства. Методика основана на концепции многомасштабного моделирования механического поведения кузова при эксплуатационных нагрузках. Рассматриваются модели проектируемого каркасно-панельного кузова, его наиболее нагруженной секции, композитных сэндвич-панелей обшивки, области клеемеханического соединения панелей обшивки с трубчатым каркасом кузова, модели лабораторных образцов с нахлесточным клеемеханическим соединением и макетов панелей для механических испытаний. Модели разработаны в современных программных пакетах с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Выполнена верификация моделей, исследована сходимость

и выбраны параметры конечных элементов для получения требуемой точности решений.

На основе разработанных моделей проведены расчеты НДС каркасно-панельной конструкции трамвайного вагона при двух режимах эксплуатационного нагружения, соответствующих нормам для проектирования механической части новых вагонов. Рассчитаны эквивалентные модули Юнга композитных сэндвич-панелей обшивки. Исследовано влияние толщины клеевого слоя между каркасом и панелями обшивки на распределение нагрузки между ними. Показана возможность выравнивания нагрузок между элементами каркаса и панелями обшивок за счет регулирования жесткости клеевого шва переменной толщины и механического упрочнения соединения самонарезающими винтами. На основе расчетов НДС клеемеханических соединений по разработанным моделям и результатам механических испытаний образцов построены аналитические зависимости и номограммы, связывающие толщину клеевого слоя, шаг армирования соединения самонарезающими винтами и погонную жесткость соединения. Номограммы позволяют подобрать шаг армирования, обеспечивающий жесткость клеемеханического соединения, требуемую для получения эффективного распределения нагрузок между элементами каркаса и панелями обшивки с учетом фактических толщин клеевых швов.

Изложены этапы методики расчета элементов каркасно-панельного кузова транспортного средства при его проектировании. Методика проиллюстрирована на примере расчета каркасно-панельной конструкции трамвайного вагона.

**В третьей главе** проведен расчетно-экспериментальный анализ механического поведения клеемеханических соединений с композитными элементами при квазистатическом нагружении. Представлены результаты экспериментальных исследований механических характеристик элементов соединений: образцов хаотически армированного стеклопластика, эластичной клеевой композиции, самонарезающих винтов, а также самих

клеемеханических соединений. Рассмотрены два способа усиления клеевых соединений: стальными самонарезающими винтами и алюминиевыми односторонними заклепками. Проведено сравнение результатов испытаний двух видов соединений, отмечены недостатки использования заклепок и показано преимущество использования самонарезающих винтов.

Разработана модель клеемеханического соединения «металл-композит», армированного самонарезающими винтами. Модель учитывает ряд важных особенностей соединения: физическую и геометрическую нелинейность механического поведения материала клеевого шва, область композиционного материала с повреждениями, полученными при монтаже винта, контактные условия с возможностью размыкания на границе винта и стеклопластика. Модель реализована в программном пакете ANSYS. Ряд параметров модели, в том числе, механические свойства поврежденного композиционного материала, подобраны из условия соответствия экспериментальных и расчетных диаграмм деформирования образцов с клеемеханическим соединением. Модель позволяет определять НДС всех элементов соединения и прогнозировать диаграмму «усилие-перемещение» клеемеханических соединений, используемую в разработанной в главе 2 методике проектирования.

**Четвертая глава посвящена** исследованию долговечности металло-композитных клеемеханических соединений, армированных самонарезающими винтами. Предложен способ повышения долговечности соединений за счет дополнительной обработки клеевой композицией отверстий под самонарезающие винты и поверхности винтов. Эффективность предложенного способа подтверждена экспериментальными исследованиями поведения клеемеханических соединений при циклическом нагружении. В результате проведенных исследований выявлены закономерности падения жесткости (роста податливости) исследованных соединений при увеличении циклов нагружения. Это позволило предложить инженерную методику оценки долговечности клеемеханических соединений, армированных

самонарезающими винтами, при многоцикловом нагружении на основе экстраполяции результатов испытаний соединений на малоцикловое нагружение. Полученная зависимость амплитудной нагрузки от предельного числа циклов нагружения рассматриваемого соединения использовалась в методике проектирования каркасно-панельных кузовов транспортных средств, разработанной в главе 2.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации** вполне достаточна и следует из анализа содержания научно-квалификационного труда соискателя.

### **Научная новизна**

1) Разработана новая методика проектирования каркасно-панельных кузовов транспортных средств с композитными сэндвич панелями и клеемеханическими соединениями. Методика учитывает геометрические несовершенства каркаса кузова, дает возможность управления жесткостью соединений элементов каркаса и панелей для эффективного распределения нагрузок и обеспечивает достижение требуемой долговечности конструкции кузова.

2) Разработана новая методика прогнозирования статической прочности клеемеханических соединений с композитными элементами при квазистатическом нагружении.

3) Предложен новый способ управления жесткостью и прочностью клеемеханических соединений композитных сэндвич-панелей и стального каркаса транспортных машин за счет обоснованного выбора шага размещения армирующих элементов.

4) Выявлены закономерности падения жесткости клеемеханических соединений, армированных самонарезающими винтами, при циклическом нагружении и предложена новая инженерная методика оценки долговечности клеемеханических соединений при многоцикловом нагружении на основе экстраполяции результатов испытаний на малоцикловое нагружение.

**Теоретическая значимость полученных автором результатов** определяется разработкой новой концепции проектирования кузова транспортного средства на основе многомасштабного моделирования механического поведения его элементов при эксплуатационных нагрузках, а также разработкой новых математических моделей метало-композитных клеемеханических соединений, армированных самонарезающими винтами и выявлением новых особенностей и закономерностей механического поведения исследуемых соединений при квазистатических и циклических нагрузках.

**Практическая значимость полученных автором результатов** определяется созданием новой методики проектирования каркасно-панельных кузовов транспортных средств с композитными сэндвич панелями и клеемеханическими соединениями. Методика использовалась автором при проектировании новых трамвайных вагонов модульной конструкции в рамках НИОКТР, выполняемой ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» в кооперации с АО «Уралтрансмаш». Практическая значимость работы подтверждена заявкой на изобретение (патент РФ), поданной по результатам исследований.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

По диссертационной работе Шакирова Александра Александровича имеются следующие замечания:

1. Основная глава диссертации – глава 2 «Методика проектирования каркасно-панельного кузова с макрогеометрическими отклонениями» разработана с использованием результатов решений частных задач по моделированию и анализу механического поведения клеемеханических соединений при квазистатическом и циклическом нагружении, изложенных в последующих разделах 3 и 4. Такая последовательность изложения материала, в ряде случаев, затрудняет понимание доказательств положений методики, предложенной автором.
2. Проиллюстрируем предыдущее замечание примером. В главе 2 на стр. 61 диссертации при изложении этапа д) методики для проверки статической

прочности соединения используется расчетная диаграмма статического деформирования клеемеханического соединения, армированного одним самонарезающим винтом, показанная на рис. 33. При этом сама диаграмма получена в главе 3 на стр.97 (рис. 61) в результате решения довольно сложной задачи МДТТ по моделированию процессов деформирования исследуемого соединения с учетом ряда нелинейных эффектов. Однако диаграмма в главе 3 (рис. 61) лишь качественно похожа на диаграмму главы 2 (рис. 33) и имеет другие значения усилий по оси ординат, а кроме того, области разброса экспериментальных данных. Экспериментальные диаграммы на рис.55 качественно похожи на расчетную диаграмму рис.61, если принять, что в обозначении диаграмм рис.55,а, б допущена ошибка. Итак, появление на стр. 61 рисунка 33 с необоснованными на момент прочтения результатами, во-первых, затрудняет понимание материала; во-вторых, возникает вопрос: какие значения усилий должны быть на этой диаграмме; и, в-третьих, если, согласно методике, подставить в диаграмму сдвиговые усилия и определить перемещения исследуемого соединения, то каким образом далее проверять статическую прочность соединения?

3. В разделе 2.1 решается ряд задач по расчету НДС модели типовой панели с использованием оболочечных и пространственных конечных элементов. Постановка этих задач описана не полностью и вызывает ряд вопросов: во-первых, решалась ли задача для полной панели или её части, показанной на рис. 18,а; во-вторых, какие граничные условия принимались для этих задач, в частности, для задач, результаты решения которых показаны на рис. 19; в-третьих, какая задача решалась для определения модуля Юнга эквивалентной обшивки, с чем сравнивались её результаты (с экспериментом или расчетом) и как определялась вторая упругая константа (модуль сдвига или коэффициент Пуассона) для эквивалентной обшивки? Кроме того, представляет интерес описание условий сопряжения оболочечных и объемных конечных элементов в

разработанной модели. Каким образом в стандартном алгоритме «склейки» сопрягаемых оболочечных и пространственных конечных элементов, встроенном в программный пакет ANSYS, на который ссылается автор, обеспечивается равенство мембранных перемещений, усилий, углов поворотов и моментов в оболочечных элементах, с одной стороны, и перемещений и сил в пространственных элементах, с другой стороны?

4. В тексте диссертации есть ряд небольших неточностей, затрудняющих понимание материала, например: нет математического определения параметра отношения сторон панели  $d$ , который на рис. 18,б рассматривается в пределах  $1-1/4$ , а на рис. 32 - от 1 до 4, связано ли обозначение сторон панели с её ориентацией в составе кузова; не показаны стеклопластиковые обшивки панели на рис. 18,а; при обсуждении полученных зависимостей эффективного модуль Юнга панели на рис. 18,б необходимо описание расчетной схемы; на странице 61 ссылка на расчетную диаграмму - (гл.3, рисунок 33) непонятна; не указано, какие напряжения приведены на рис. 23; на рис. 55 и 56 обозначения диаграмм (а и б) для исходных и армированных соединений, вероятно, перепутаны.

Сделанные замечания не ставят под сомнение значимость представленных в диссертации результатов и квалификацию исполнителя.

Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертационной работы. По результатам диссертационной работы имеется шесть публикаций, в том числе две статьи в журналах из списков Web of Science, Scopus и четыре статьи в журналах, рекомендованных ВАК, оформлена заявка на изобретение (патент РФ). Диссертационная работа хорошо оформлена и иллюстрирована, проведен полный литературный обзор, имеется три приложения с листингами расчетных моделей в пакете ANSYS и экспериментальными диаграммами испытаний, текст работы написан правильным научным языком.



**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней».**

Суммируя вышесказанное можно утверждать, что диссертационная работа Шакирова Александра Александровича на соискание ученой степени кандидата технических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по разработке новых моделей функционирования, методов оценки технического состояния нахлесточных клеемеханических соединений металлических и композиционных материалов и новой методики проектирования кузовов каркасно-панельных транспортных средств с композитными сэндвич-панелями, имеющей существенное значение для развития транспортного машиностроения.

Диссертационная работа Шакирова А.А. "Повышение долговечности каркасно-панельных кузовов транспортных средств с макрогеометрическими отклонениями при помощи клеемеханических соединений с управляемой жесткостью" соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а её автор Шакиров Александр Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.02 - "Машиноведение, системы приводов и детали машин".

Официальный оппонент - доктор технических наук, профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»  
Адрес: 6149900, РФ, Пермский край, г. Пермь – ГСП, Комсомольский пр. 29  
E-mail: [rector@pstu.ru](mailto:rector@pstu.ru), телефон +7(342)2123927

Докторская диссертация защищена по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

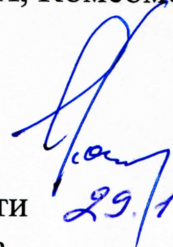
Адрес места основной работы:

6149900, РФ, Пермский край, г. Пермь – ГСП, Комсомольский пр. 29.

Рабочий телефон: +7(342)2391294; адрес электронной почты: [anoshkin@pstu.ru](mailto:anoshkin@pstu.ru)

Подпись А.Н. Аношкина заверяю



  
А.Н. Аношкин  
29.12.2016

  
В.И. Макаревич