

На правах рукописи



Шакиров Александр Александрович

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КАРКАСНО-ПАНЕЛЬНЫХ КУЗОВОВ  
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С МАКРОГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ  
ОТКЛОНЕНИЯМИ ПРИ ПОМОЩИ КЛЕЕМЕХАНИЧЕСКИХ  
СОЕДИНЕНИЙ С УПРАВЛЯЕМОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ

05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск - 2016

Работа выполнена на кафедре «Техническая механика» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:

**Сапожников Сергей Борисович**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

**Аношкин Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

**Игнатъев Андрей Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Челябинск

Ведущая организация:

Уральский федеральный университет имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится «18» января 2017 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001 гл. корп.

Тел/факс: (351) 267-91-23. E-mail: [D212.98.09@mail.ru](mailto:D212.98.09@mail.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на сайте <https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229809/shakirov-aleksandr-aleksandrovich>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор

Е.А. Лазарев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

Каркасно-панельные конструкции широко применяются для изготовления модулей операторов управления промышленными машинами (грузовые краны, экскаваторы, прокатные станы), кузовов наземных транспортных машин, на водном транспорте и других областях. Наиболее характерной областью применения каркасно-панельных конструкций являются наземные пассажирские перевозки в транспортных средствах, имеющих высокую пассажировместимость, где современные тенденции повышения экономической и экологической эффективности использования транспортных машин требуют разработки новых концепций проектирования облегченных длинномерных кузовов с расширенным применением трехслойных панелей. Вопросам проектирования и расчета перспективных кузовов посвящены работы таких исследователей, как О.В. Воронков, А.С. Вашурин, А.Н. Балалаев, Д.А. Загарин, А.М. Иванов, D. Wennberg, M. Grasso, К.-В. Shin, J.-S. Kim, H. Ning и др.

Особый интерес представляют трехслойные конструкции в виде композитных сэндвич-панелей, которые более технологичны в мелкосерийных изделиях с высокими требованиями к эстетичности и точности изготовления, чем традиционные металлические, получаемые штамповкой. Дополнительная технологичность достигается за счет более простой и экономичной оснастки для изготовления композитных изделий (по литературным данным до 40-60%), совмещения их функций как силовых, так и звуко-, теплоизолирующих и декоративных элементов. Существенный вклад в исследования механического поведения композитных панелей (в том числе, подкрепленных каркасом) внесли А.Н. Аношкин, М.И. Мартиросов, Н.С. Азиков, Н.Н. Федонюк, L. Ma, L. Wu, Y. Frostig, O.T. Thompsen и др.

Стремление к снижению себестоимости отмеченных длинномерных кузовов заставляет использовать стальные горячекатаные профили, геометрия которых имеет на больших длинах значительные макрогеометрические отклонения (вогнутость/выпуклость сторон, скручивание). В результате сборки/сварки каркаса эти несовершенства приводят к наличию отклонений во внешней геометрии, которые при вклейке сэндвич-панелей компенсируются, но приводят к клеевым швам переменной толщины от 1 до 6 мм. Здесь рассматриваются лишь низко модульные клеевые композиции, способные заполнить такие зазоры без снижения механических свойств. Макрогеометрические отклонения геометрии каркаса ранее не учитывались в методиках проектирования, что приводило к необходимости применения таких нетехнологичных методов, как правка каркаса или применение технологии монтажа обшивок из цельнотянутого листа, компенсирующей местные несовершенства.

Таким образом, необходима коррекция существующих методик проектирования каркасно-панельных кузовов за счет учета макрогеометрических отклонений каркаса и управления жесткостью клеевых соединений переменной толщины, обеспечивающих выравнивание нагрузок на каркас и заданную долговечность в эксплуатации.

В современной литературе отмечается, что наиболее рациональным способом повышения прочности, сдвиговой жесткости и гибкого управления свойствами является трансверсальное армирование клеевых соединений механическими элементами. Такого рода соединения относят к группе клеомеханических. Вопросам расчета, испытаний и проектирования клеомеханических соединений посвящены работы таких отечественных и зарубежных исследователей, как В.Д. Вермель, В.Н. Максименко, В.Г. Черкасов, G. Kelly, Y.-B. Park, J.-H. Kweon и др. За последние пять лет объем научных публикаций по указанной тематике увеличился более чем в три раза и продолжает расти (анализ проведен с использованием систем индексирования Web of Science, SCOPUS и РИНЦ). Одним из наиболее перспективных видов армирующих элементов являются стальные самонарезающие винты, сочетающие в себе технологичность и высокий уровень несущей способности. При этом не решена проблема обеспечения заданной долговечности клеевых соединений «композит-сталь», армированных самонарезающими винтами.

Таким образом, актуальным является развитие метода управления жесткостью клеевых соединений с помощью трансверсальных элементов – самонарезающих винтов, на основе которого в данной работе предложена новая методика повышения долговечности высоконагруженных элементов длинномерного кузова транспортного средства со стальным каркасом, имеющим макрогеометрические отклонения, и клеиваемыми силовыми композитными сэндвич-панелями.

**Цель работы:** повышение долговечности каркасно-панельных кузовов транспортных средств с макрогеометрическими отклонениями с использованием клеомеханических соединений с управляемой жесткостью за счет армирования самонарезающими винтами.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленных целей в работе сформулированы две основные задачи:

1. Разработать методику комплексного трехмерного проектирования длинномерных композитных каркасно-панельных кузовов заданной долговечности с применением клеомеханических соединений переменной толщины с трансверсальными армирующими элементами – самонарезающими винтами. Методика позволяет выработать рекомендации по шагу армирования, обеспечивающему повышение долговечности стального каркаса отмеченных кузовов.

2. Разработать численные модели для расчета напряженно-деформированного состояния и оценки долговечности клеомеханических нахлесточных соединений типа «композит-сталь» с применением самонарезающих винтов при квазистатическом и циклическом нагружении.

**Объект исследования.** Длинномерная каркасно-панельная конструкция наземного транспортного средства с нахлесточными клеомеханическими соединениями типа «композит-сталь» на основе низко модульных полиуретановых клеевых композиций с переменной толщиной клеевого слоя и самонарезающими винтами.

**Методы исследования.** В работе выполнено многомасштабное трехмерное моделирование каркасно-панельных конструкций (пакеты SolidWorks, SpaceClaim), широко использован метод конечных элементов (пакет ANSYS Workbench) для анализа напряженного состояния, кинетики нелинейного деформирования и оценки прочности соединений при их квазистатическом нагружении. Используются экспериментальные методы исследования механических свойств материалов и кинетики деформирования и прочности соединений при статическом и циклическом нагружениях.

**Достоверность** полученных результатов обеспечена экспериментальными исследованиями, которые были проведены на современном испытательном оборудовании (научно-образовательные центры «Экспериментальная механика» и «Нанотехнологии» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», ЦКП «Центр экспериментальной механики» ФГБОУ ВО «ПНИПУ»). Исследования проведены на поверенном оборудовании, ЦКП «Центр экспериментальной механики» аккредитован в Системе ГОСТ Р на техническую компетентность и независимость проведения механических испытаний материалов (аттестат аккредитации испытательной лаборатории (центра) № РОСС RU.0001.21ЧС98 от 27.04.2012 г

Результаты численного моделирования с использованием разработанных конечно-элементных моделей показали соответствие полученным экспериментальным данным для натуральных образцов и макетов в пределах статистического разброса.

#### **Научная новизна работы.**

1. Разработана новая методика проектирования кузова транспортной машины каркасно-панельной структуры заданной долговечности, отличающаяся тем, что учитываются геометрические несовершенства каркаса, а композитные несущие сэндвич-панели вклеены в него, компенсируя отмеченные несовершенства за счет существенной вариации толщины клеевого слоя. При этом управление жесткостью соединений обеспечивает выравнивание нагрузок на каркас и повышение долговечности конструкции кузова.

2. Предложен новый способ управления жесткостью и прочностью клеемеханических соединений композитных сэндвич-панелей и стального каркаса наземных транспортных машин, отличающийся обоснованным выбором шага размещения армирующих элементов – самонарезающих винтов.

3. Разработана новая инженерная методика оценки многоциклового прочностии клеемеханических соединений с самонарезающими винтами, отличающаяся использованием информации об изменении податливости соединений при проведении лишь малоцикловых испытаний.

**Практическая ценность и реализация результатов работы.** Результаты работы использованы в рамках НИОКТР «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда инновационных энергосберегающих трамвайных вагонов модульной конструкции для развития городских пассажирских транспортных систем», выполняемого ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» в кооперации с АО «Уралтрансмаш» при финансовой поддержке Министерства обра-

зования и науки Российской Федерации по договору № 02.G25.31.0108 от 14.08.2014 г.

**Апробация работы.** Данная работа и ее промежуточные результаты докладывались на научных конференциях:

- ежегодные научные конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ (2014–2016 гг.);

- XVIII Международная конференция «Механика композитных материалов» (2014, г. Рига);

- международная научно-практическая конференция по инженерной механике (2015, г. Лондон);

- доклад на объединенном научном семинаре кафедр «Техническая механика» и «Автомобильный транспорт» ЮУрГУ (2016).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 6 научных статей, из них 2 – в изданиях, входящих в базы данных Scopus/Web of Science и 4 статьи – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Выявлены основные факторы, влияющие на нагруженность элементов каркасно-панельных конструкций наземных транспортных средств в процессе эксплуатации.

2. Развита инструментарий многомасштабного моделирования каркасно-панельных конструкций, позволяющий повысить точность и снизить трудоемкость расчетных процедур оценки прочности и долговечности.

3. Выделены и охарактеризованы этапы реализации метода повышения долговечности и надежности каркасно-панельных кузовов транспортных средств с существенно переменными зазорами между панелями и каркасом.

4. Выведены расчетные зависимости, позволяющие прогнозировать наступление предельного состояния клеемеханических соединений с самонарезающими винтами при циклическом нагружении в области малоциклового и многоциклового усталости.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, 3 приложений, списка использованных источников из 188 наименований. Общий объем работы составляет 164 страницы (из них 29 страниц – приложения), 113 рисунков (из них 41 рисунок в приложениях) и 14 таблиц (из них 1 таблица – в приложениях).

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлены актуальность, научная новина и краткая характеристика работы, сформулированы цель и задачи исследований, а также основные положения, выносимые автором на защиту.

**В первой главе** проведен обзор отечественной и зарубежной литературы, посвященной анализу концепций проектирования высоконагруженных кузовов длинномерных транспортных средств. Рассмотрены перспективные конструкции кузовов с широким применением композитных материалов в силовых компонентах.

Среди транспортных средств городского и междугороднего сообщения (трамваи, метро, автобусы, пассажирские поезда) наибольшей весовой эффективностью обладают конструкции с полукаркасными (Д.А. Загарин, Л.Д. Кузьмич, Р. Heller, Н. Ning, J.-S. Kim, А.М. Harte и др.) и бескаркасными (А.С. Ващурин, А.Н. Балалаев, D. Wennberg, J.Y. Lee, К.-В. Shin, Т. Langan и др.) несущими кузовами. При этом наибольшее распространение по причине экономичности и технологичности получили гибридные каркасно-панельные конструкции, несущие компоненты которых выполнены из разнородных материалов: силовых сэндвич-панелей с обшивками из полимерных материалов (стеклопластик) и стального поддерживающего каркаса, предложенные такими исследователями, как Р. Heller, J.-S. Kim, А.М. Harte и др. Поддерживающий каркас в таких конструкциях располагается между обшивок сэндвич-панелей перед их отверждением в процессе изготовления кузова.

В случае применения несущего каркаса из волокнистых композитных материалов возможен монтаж готовых сэндвич-панелей путем вклеивания в каркас по аналогии с элементами остекления, который предложили в своих работах U. Vaidya, Н. Ning.

Указанный метод вклеивания панелей в каркас представляет значительный интерес для дальнейших исследований, т.к. не требует переоснащения производственной базы, ориентированной на мелкосерийное изготовление стальных каркасных длинномерных кузовов. Экономическая привлекательность применения в каркасах стальных горячекатаных профилей породила проблему геометрических несовершенств кузовов, обусловленных имеющимися допусками на криволинейность профилей и, соответственно, допусками существующих технологий сборки-сварки стальных каркасов из них. При этом внешний контур транспортного средства должен быть эстетичным, достаточно гладким. При вклеивании сэндвич-панелей это приводит к необходимости использования клеевых прослоек существенно переменной толщины (1-6 мм). Макрогеометрические отклонения геометрии каркаса ранее не учитывались в методиках проектирования, что приводило к необходимости правки каркаса или применения технологии монтажа обшивок из цельнотянутого листа, компенсирующих местные несовершенства. Пластические деформации и микротрещины после правки неконтролируемо снижают долговечность конструкции транспортного средства.

Отмеченные факторы требуют развития методов управления жесткостью и прочностью клеевых соединений переменной толщины, а также создания соответствующих методик проектирования каркасно-панельных кузовов с такими соединениями.

В работе выполнен анализ существующих видов соединений с точки зрения обеспечения жесткости, прочности и гибкого управления его свойствами в составе каркасно-панельного кузова транспортного средства. Анализ показал, что наиболее надежными и долговечными являются комбинированные (клееболтовые, клеезаклепочные, клеештифтовые и др.) нахлесточные соединения с высокомодульным клеевым слоем малой толщины, подробно изученные в ра-

ботах отечественных и иностранных исследователей: В.М. Попов, С.С. Куреннов, G. Kelly, R.B. Heslehurst, L. Tong, M.D. Banea и др.

В авиационных конструкциях в роли армирующих (усиливающих) элементов таких соединений выступают цилиндрические металлические игольчатые элементы (z-pins) диаметром менее 0,2-0,5 мм, что экономически невыгодно для наземных транспортных средств, или резьбовые металлические элементы (болты) и заклепки диаметром более 4-12 мм (Г.Ф. Рудзей, В.Д. Вермель, К.М. Рудаков, G. Kelly, Y.-B. Park, J.-H. Kweon и др.). Применение низко модульных клеев и труб в стальном каркасе делает невозможным или нетехнологичным использование заклепок или болтов (сжатие клеевого слоя и искажение внешней геометрии, необходимость доступа к внутренней стороне соединения в случае болтов).

Отмечено, что в клеємеханических соединениях конструкций из дерева (природный композит) широко используют технологичные стальные самонарезающие винты (шурупы), не требующие доступа с тыльной стороны и имеющие возможность регулировать усилие сжатия. Однако R.B. Heslehurst, A.S. Mossalam и L.C. Hollaway высказывали сомнения в эффективности применения самонарезающих винтов в циклически высоконагруженных соединениях полимерных волокнистых композитов. Причина – локальное разрушение пластика в зоне отверстий, которое происходит за счет недостаточной пластичности полимерной матрицы и возникновения дефектов (расслоений, микротрещин), создаваемых при сверлении отверстия и монтаже армирующего элемента. Указанные эффекты, однако, могут быть минимизированы и учтены при проектировании клеевых соединений заданной долговечности.

На основе проведенного анализа сформулированы **цели и задачи** диссертационного исследования.

**Во второй главе** предложена новая концепция проектирования длинномерных каркасно-панельных кузовов транспортных средств на основе многомасштабного моделирования для обеспечения заданной долговечности с применением соединений на эластичных клеях с трансверсальным армированием самонарезающими винтами. Концепция охватывает полный цикл проектирования каркасно-панельного кузова, включая проектировочные и проверочные расчеты.

На примере наземного транспортного средства (кузов низкопольного трамвайного вагона, рисунок 1, нагружение по режиму II «Норм для расчета и проектирования механической части новых вагонов трамвая колеи 1524 мм» - разгон/торможение на криволинейном участке пути) проведено расчетное исследование напряженно-деформированного состояния композитных сэндвич-панелей и стального каркаса боковин у дверного проема (критическая область, рисунок 1) с переменной толщиной клея 1-6 мм (герметик полиуретановый TEROSTAT 8590) методом конечных элементов (МКЭ). Типовая сэндвич-панель имеет размеры 500x1500мм, обшивки панели – хаотически армированный стеклопластик толщиной 3 мм, наполнитель – пенопласт Divynicell P100 толщиной 20 мм, каркас – горячекатаная стальная труба по ГОСТ 8645-68



(100x60x4 мм и 40x40x3 мм). Отмеченная вариация толщины клея определяется допусками на кривизну катаных труб заданной длины.

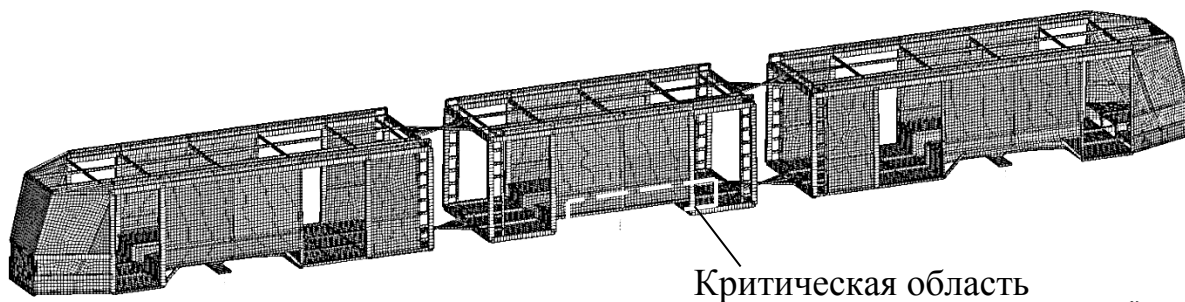


Рисунок 1 – МКЭ-модель кузова сочлененного трамвайного вагона

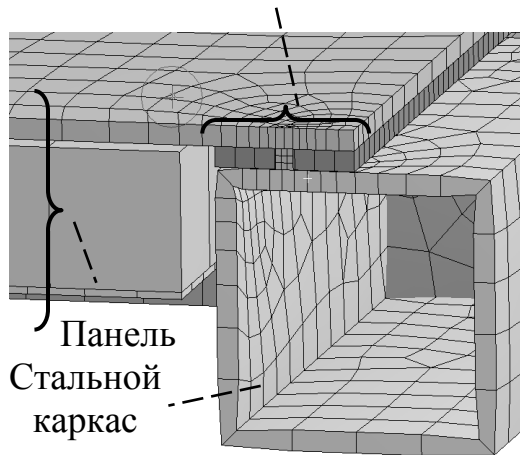
Анализ напряженно-деформированного состояния кузова показал, что для рассмотренного в примере режима нагружения характерны значительные переменные вертикальные поперечные нагрузки от силы тяжести и инерции самого вагона, пассажиров, а также навесного оборудования (добавочные силы инерции обусловлены вертикальными колебаниями вагона при движении по рельсовому пути). Отмеченные нагрузки приводят к поперечному изгибу кузова вагона, в результате которого боковины вынуждены воспринимать как растягивающие/сжимающие, так и существенные сдвиговые нагрузки.

Автором развит инструментарий комбинирования упрощенной (эквивалентной по геометрии и жесткости) МКЭ-модели кузова вагона в целом и детализированной МКЭ-модели наиболее нагруженного участка кузова. Упрощенная МКЭ-модель имеет каркас из балочных конечных элементов (КЭ) и тонкостенную обшивку постоянной толщины  $t = 3$  мм из оболочечных КЭ, абсолютно жестко привязанную к каркасу и обеспечивающую сдвиговую жесткость кузова, эквивалентную натурной (за счет сниженного модуля Юнга обшивки). Модуль Юнга эквивалентной обшивки определен из условия равенства перемещений при сдвиге с детализированной МКЭ-моделью типовой панели.

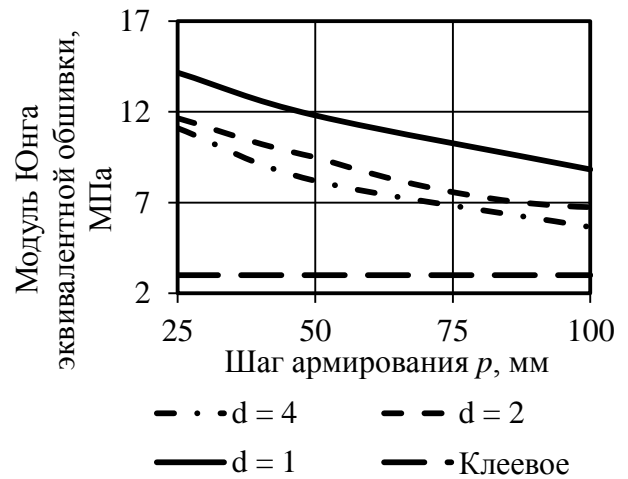
В детализированной МКЭ-модели типовой панели использованы оболочечные КЭ для моделирования композитной обшивки и стального каркаса, объемные КЭ – для заполнителя, клеевого слоя, а также – для цилиндрических элементов, эквивалентных по сдвиговой жесткости самонарезающим винтам (рисунок 2а). Верификация МКЭ-модели выполнена путем расчетно-экспериментального анализа масштабных макетов каркасно-панельной конструкции.

Был выполнен цикл расчетов напряженно-деформированного состояния соединений с различными размерами конечных элементов. В результате сопоставления результатов определены размеры КЭ, обеспечивающие достаточную для целей проектирования точность расчетов (отклонение по величинам напряжений не более 5% от решения к которому стремится модель при дальнейшем измельчении конечных элементов).

## Клеемеханическое соединение



а)



б)

Рисунок 2 – МКЭ-моделирование кузова трамвайного вагона:  
а) детализированная МКЭ-модель; б) модуль Юнга эквивалентной обшивки

Зависимость модуля Юнга эквивалентной обшивки от соотношения длинной и короткой сторон типовой панели  $d$  и шага армирования  $p$  самонарезающими винтами при толщине клеевого шва 1 мм показана на рисунке 2б.

Расчетное исследование показало, что каркас передает на панели лишь сдвиговую часть общей нагрузки, а в случае максимальной толщины клея каркас вынужден сам воспринимать сдвиг, что вызывает в нем возникновение значительных напряжений, резко снижающих долговечность.

Анализ величины максимальных эквивалентных напряжений в нагруженном элементе каркаса от толщины клеевого слоя (критическая область на рисунке 1) показал, что перепад толщины клеевого шва для соседних панелей величиной 5 мм приводит к снижению напряжений в наружной обшивке панели на 65%, и повышению напряжений в основных несущих трубах каркаса на 20%.

Высокие требования к долговечности конструкции при ее минимальном весе требуют выравнивания нагрузок на композитные панели и каркас за счет регулирования жесткости клеевого шва переменной толщины. В данной работе предложен новый способ управления жесткостью, отличающийся использованием самонарезающих винтов малого диаметра, гл.1. Использование в критической области с перепадом толщины клеевого слоя между панелями  $h = 1-6$  мм клеємеханических соединений с шагом армирования  $p = 25-100$  мм приведет к 40% снижению максимальных напряжений в основных несущих трубах стального каркаса. При этом дополнительный эффект будет достигнут не только за счет выравнивания, но и за счет значительного возрастания жесткости соединений каркаса и панелей.

Концепция управления жесткостью реализована за счет использования разработанных номограмм, связывающих между собой толщину клеевого слоя ( $h$ , мм), шаг армирования самонарезающими винтами ( $p$ , мм) и погонную жест-

кость соединения ( $C_l$ , Н/мм<sup>2</sup>), определяемую в расчете на единицу длины соединения.

Аналитические зависимости, положенные в основу номограмм, получены автором с использованием допущения о том, что для любого материала, в том числе, композитного, клеемеханическое соединение может быть разбито на два параллельно работающих компонента, связанных с клеевым слоем и самонарезающими винтами соответственно:

$$C_l = C_z + C_b = \frac{C_{sc}(h)}{p} + \frac{b \cdot G}{h} \quad (\text{Н/мм}^2), \quad (1)$$

где  $C_z$  – погонная жесткость механической части соединения, Н/мм<sup>2</sup>;

$C_b$  – погонная жесткость клеевой части соединения, Н/мм<sup>2</sup>;

$C_{sc}$  – жесткость только механического соединения с одним самонарезающим винтом из испытаний, Н/мм;

$b$  – ширина нахлесточного клеемеханического соединения, мм;

$G$  – модуль сдвига клеевого слоя, МПа.

Жесткость механического соединения с одним самонарезающим винтом описывается следующей аппроксимирующей зависимостью, полученной на основе результатов испытаний механических соединений, армированных самонарезающими винтами:

$$C_{sc}(h) = \frac{50}{1,354 \cdot 10^{-3} \cdot h^2 + 0,0145} \quad (\text{Н/мм}). \quad (2)$$

Эффективность передачи сдвиговых нагрузок с помощью армированных соединений можно оценить через модуль упругости эквивалентной обшивки (рисунок 2б). При шаге армирования 25 мм он составляет ~ 12 ГПа, что близко к модулю упругости наружной обшивки натурной сэндвич-панели той же толщины, в основном определяющей жесткость панели. Таким образом, армированные соединения обеспечивают эффективную передачу нагрузок, близкую к абсолютно жесткому соединению сэндвич-панелей и каркаса.

На примере кузова трамвайного вагона разработана методика проектирования каркасно-панельной конструкции. Методика включает в себя следующие этапы:

1. На основе измеренных отклонений геометрии готового стального каркаса определяются фактические толщины клеевых швов изготавливаемой каркасно-панельной конструкции. При помощи соответствующих номограмм (рисунок 3а) подбирается шаг армирования самонарезающими винтами  $p$ , обеспечивающий выравнивание жесткости клеевых соединений в наиболее нагруженных зонах конструкции кузова.

2. Производится расчет напряженно-деформированного состояния конструкции при помощи МКЭ-модели кузова с эквивалентной обшивкой по режимам I (аварийный – с регламентированным учетом сил инерции) и II (эксплуатационный) «Норм для расчета и проектирования механической части новых вагонов трамвая колеи 1524 мм».

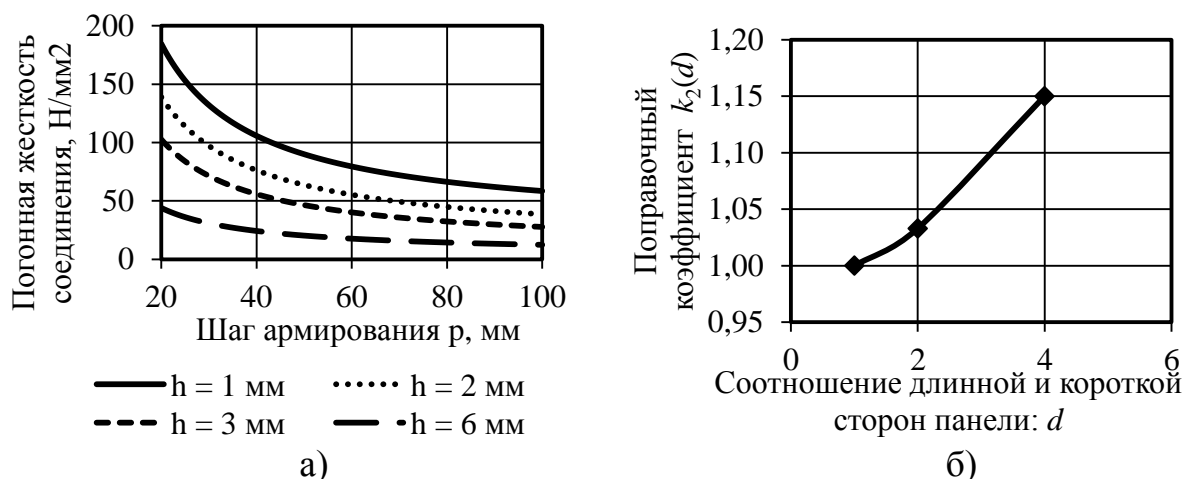


Рисунок 3 – Номограммы погонной жесткости клеемеханических соединений (а) и поправочный коэффициент по локальной нагрузке (б)

3. По каждому режиму согласно заданному шагу армирования  $p$  вычисляются сдвиговые усилия в зоне центрального армирующего элемента на длинных сторонах панелей (рисунок 4). Отмеченный элемент является наиболее нагруженным из всех элементов соединения, таким образом, для остальных элементов будет получена оценка в запас прочности. Для вычисления сдвиговых усилий используются эпюры касательных напряжений, построенные по соответствующим граням панелей эквивалентной обшивки:

$$F_0 = t \cdot \int_{X_0 - p/2}^{X_0 + p/2} \tau(x) dx, \quad (3)$$

где  $t = 3$  – толщина эквивалентной обшивки, мм;

$\tau(x)$  – эпюра касательных напряжений, построенная по грани длинной стороны панели  $x$ , МПа;

$X_0$  – координата расположения центрального армирующего элемента, равная половине длинной стороны панели, мм.

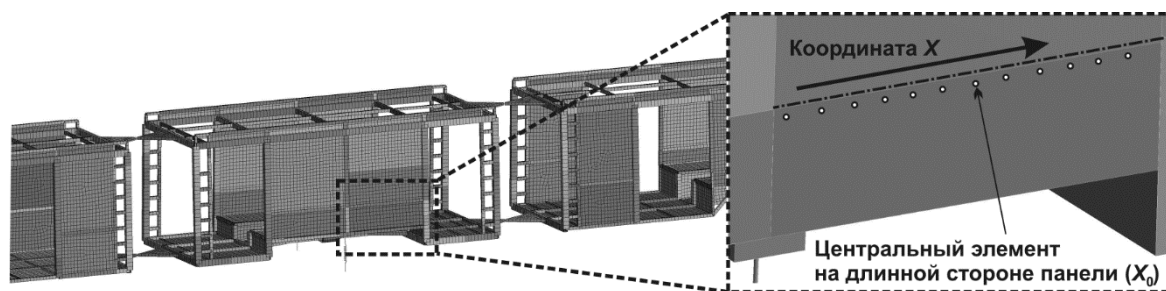


Рисунок 4 – Определение нагруженности клеемеханических соединений в составе каркасно-панельного кузова

4. Сдвиговая нагрузка, полученная по формуле (3) по каждому из режимов, уточняется с использованием коэффициентов  $k_2(d)$ ,  $k_3$ :

$$F = F_0 \cdot k_2(d) \cdot k_3 \quad (4)$$

Коэффициент  $k_2(d)$  имеет смысл коэффициента концентрации напряжений, связанного с учетом особенностей работы клеемеханических соединений в натурной конструкции. Зависимость коэффициента  $k_2(d)$  (рисунок 3б) от соотношения длинной и короткой сторон панели определена из анализа распределения сдвиговых усилий в детализированной МКЭ-модели, работающей на сдвиг.

Коэффициент  $k_3 = 1,42$  использован для учета гигротермальных эффектов, возникающих при эксплуатации транспортного средства (снижение прочности), и определен на основе анализа имеющихся в литературе оценок снижения прочности клеемеханических соединений под воздействием климатических факторов внешней среды.

5. Полученное сдвиговое усилие по режиму I подставляется в расчетную диаграмму деформирования соединения с одним винтом (гл. 3), оценивается его статическая прочность.

6. Полученное сдвиговое усилие по режиму II принимается за амплитуду циклической нагрузки в конструкции и подставляется в соответствующее уравнение, позволяющее получить количество циклов до наступления предельного состояния, то есть оценить долговечность соединений (гл. 4).

7. Производится оценка прочности стального каркаса согласно указанным Нормам.

8. В случае нарушения того или иного критерия прочности, цикл проектирования повторяется при измененном шаге армирования  $p$ . Практика расчетов показала, что достаточно 2-3 итераций для получения решения, удовлетворяющего критериям прочности.

**В третьей главе** представлен расчетно-экспериментальный анализ поведения клеемеханических нахлесточных соединений при квазистатическом однократном нагружении вплоть до разрушения, характерном для аварийного режима работы конструкции.

Рассмотрены два основных способа усиления соединений: стальными самонарезающими винтами (диаметр – 2,5 мм, 5 образцов) и алюминиевыми односторонними заклепками (диаметр – 4 мм, 5 образцов) (рисунок 5).

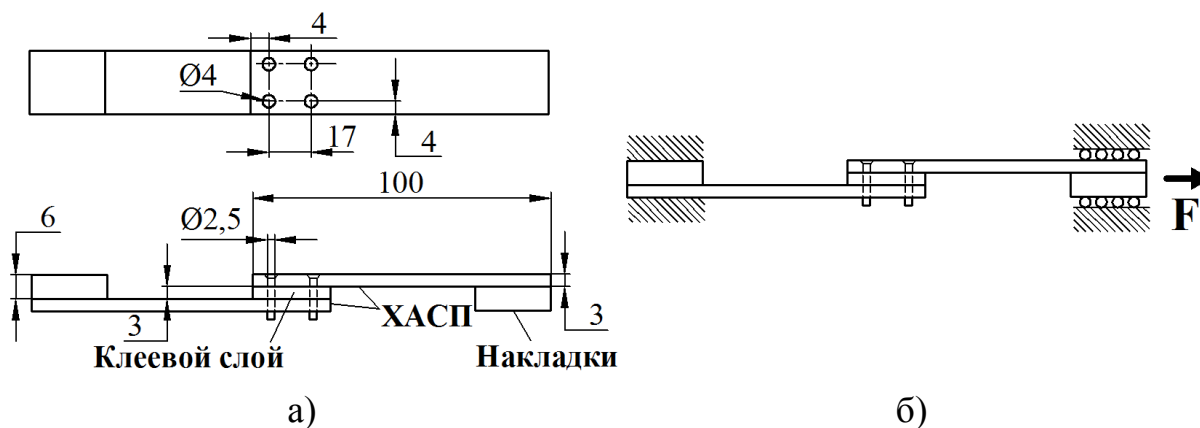


Рисунок 5 – Эскиз образца клеемеханического соединения (а) и схема его нагружения (б)

Особенность усиления заключалась в использовании армирующих элементов наименьшего из доступных диаметров для снижения влияния концентрации напряжений на прочность при растяжении композитной части конструкции.

Результаты испытаний после статистической обработки показаны в таблице 1. Оба вида армирующих элементов снижают податливость и повышают прочность клеевых соединений более чем в 1,5 и 1,25 раза соответственно.

Существенным недостатком односторонних заклепок являются остаточные усилия в трансверсальном направлении, которые после монтажа элементов приводят к уменьшению толщины низко модульного клеевого слоя (до 30%). Данный эффект негативно сказывается на точности посадки панелей в каркас и приводит к отсутствию плоскостности экстерьера, нарушая современные требования к качеству внешнего вида транспортных средств.

Следует отметить, что испытанные соединения имели по четыре армирующих элемента, следовательно, гарантированная нагрузка, которая может быть воспринята соединением, армированным одним самонарезающим винтом, составляет ~ 815 Н.

Таблица 1 – Результаты испытаний нахлесточных соединений на прочность при однократном нагружении

Тип соединения		Клее- вое	Усилен- ное за- клепками	Усиленное само- нарезающими винтами
Предельная нагрузка, Н	Среднее	2390	2985	3720
	СКО	176	970	454
	Коэффициент вариации, %	7,4	32,5	12,2
Податливость в диапазоне нагруз- ки до 50 Н <sup>1)</sup> , 1·10 <sup>-7</sup> м/Н	Среднее	34,1	3,4	7,5
	СКО	15,2	0,6	2,6
	Коэффициент вариации, %	44,5	17,1	35,3
Локальное сжатие клеевого слоя, %		–	30	5
1) Предел выносливости соединений (см. главу 4)				

Анализ напряженного состояния соединений, армированных самонарезающими винтами, проведен в МКЭ-пакете ANSYS Mechanical. Была создана конечно-элементная модель, учитывающая нелинейность механического поведения материалов и концентрацию напряжений в области отверстий под армирующие элементы. Особенностью модели является явный учет начальных повреждений в стеклопластике, вносимых монтажом самонарезающего винта в предварительно просверленное технологическое отверстие. Микротрещины были выявлены при микроскопическом исследовании поперечных разрезов образцов (рисунок 6).

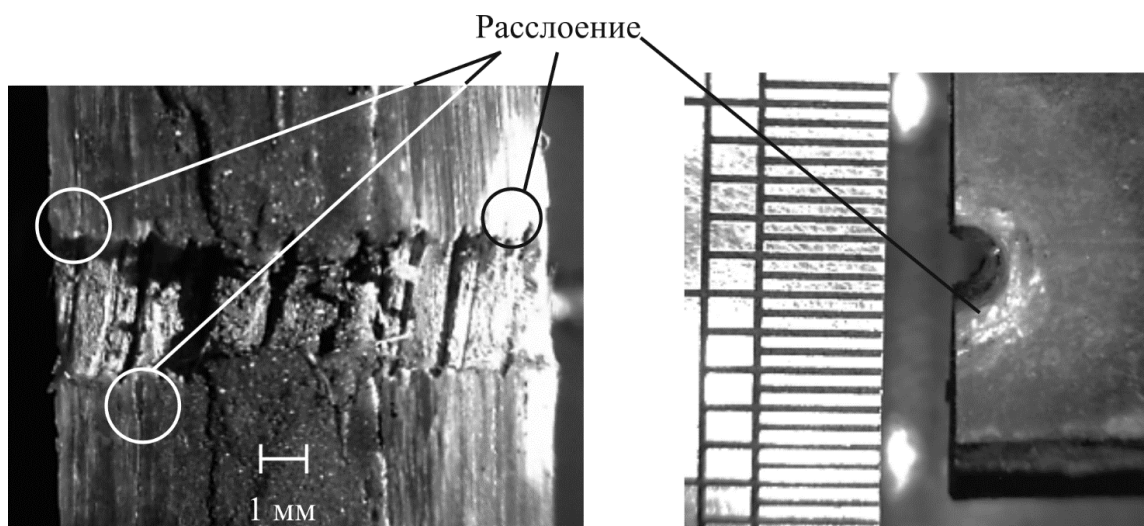


Рисунок 6 – Повреждения в стеклопластике в результате сверления отверстия и монтажа армирующего элемента: а) поперечный разрез б) вид сверху

Для их учета в цилиндрических зонах вокруг отверстий расчетной модели использован псевдоизотропный идеально-упругопластический материал с редуцированными (по сравнению с исходным материалом) механическими характеристиками. Применимость идеально-упругопластической модели материала обоснована на основе анализа диаграмм деформирования при квазистатическом деформировании образцов из хаотически армированного стеклопластика. Параметры упругопластической модели ХАСП с редуцированными упругими свойствами (модуль  $E$ ), предела текучести  $\sigma_T$  модели материала самонарезающих винтов, а также диаметр цилиндрической области  $d$ , найдены из условия наилучшего соответствия экспериментальных и расчетных диаграмм «усилие-перемещение». Диапазоны варьирования параметров составляли:  $2,5 \leq d \leq 3$  мм;  $0,25 \leq E \leq 12$  ГПа;  $100 < \sigma_T \leq 450$  МПа.

Разработанная расчетная МКЭ-модель (рисунок 7а) позволяет определить напряженно-деформированное состояние всех элементов и прогнозировать диаграмму «усилие-перемещение» (рисунок 7б) реальных соединений вплоть до разрушения с достаточной для инженерных приложений точностью.

Расчет сдвиговых нагрузок на наиболее нагруженный участок соединения реального низкопольного трамвая (формула (4), шаг армирования  $p = 50$  мм) по методике, изложенной в гл.1, показал, что в критической зоне может действовать аварийное усилие до 800-1000 Н, которое может быть воспринято винтами увеличенного до 3 мм диаметра по сравнению с использованными в данном исследовании при однократном нагружении (2,5 мм).

**В четвертой главе** представлен расчетно-экспериментальный анализ циклической прочности и жесткости соединений, армированных самонарезающими винтами, необходимый для проверки долговечности каркасно-панельной конструкции кузова.

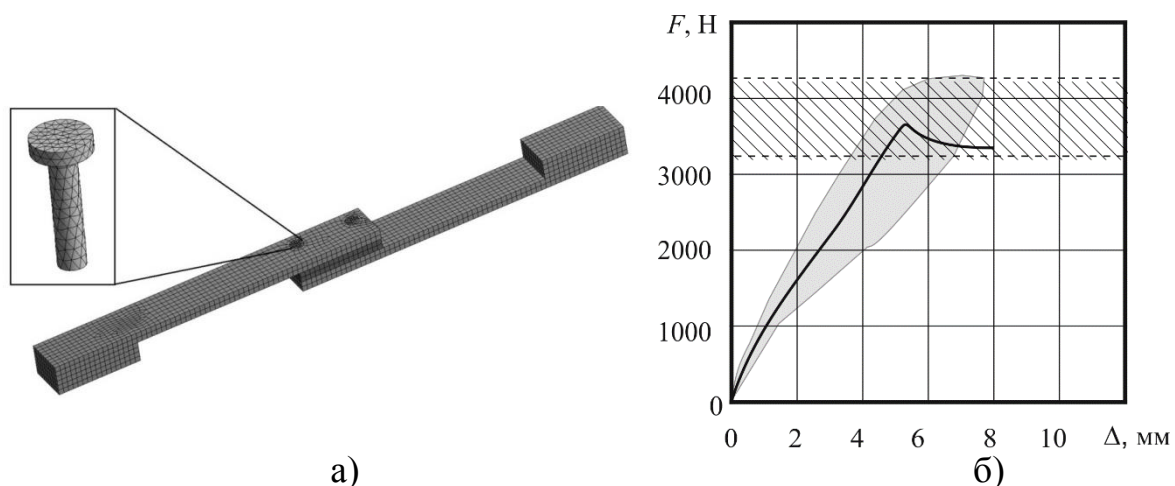


Рисунок 7 – МКЭ-модель одностороннего нахлесточного соединения (а) и расчетная диаграмма «усилие-перемещение» (б, линия – расчет; закрашенная и заштрихованная области – экспериментальный разброс результатов)

Для увеличения долговечности армированных самонарезающими винтами соединений предложен способ снижения контактных напряжений за счет заполнения зазоров между винтом и стенкой отверстия в композите полимерной композицией холодного отверждения (модифицированные соединения). С целью достижения указанного эффекта перед монтажом самонарезающих винтов с диаметром резьбы 2,5 мм создаются технологические отверстия диаметром 2 мм. Отверстия заполняются жидкой полимерной композицией, после чего в них производится монтаж винтов. Полимерная композиция проникает в пустоты и расслоения, образующиеся при монтаже самонарезающего винта, создавая монолитное соединение с увеличенной площадью взаимодействия элемента и соединяемых материалов. Эффективность предложенного способа на примере болтовых соединений отмечена также в работах В.Д. Вермеля и С.А. Титова (ЦАГИ), где сообщается о существенном возрастании циклической прочности модифицированных соединений, однако в этих работах опущены методика проведения и методы обработки результатов испытаний.

Для проведения объективной проверки эффективности способа в случае армирования самонарезающими винтами, проведены циклические испытания соответствующих исходных и модифицированных полимерной композицией образцов клеемеханических соединений при симметричном растяжении-сжатии (схема испытаний показана на рисунке 8а).

Для удобства анализа экспериментальных данных, полученных при различных уровнях нагрузки, учитывали относительные величины условной податливости образцов  $R\delta$ . Характерная диаграмма изменения относительной податливости в зависимости от номера цикла  $R\delta(N)$  показана на рисунке 8б. Диаграмма характеризуется тремя участками. Наличие начального участка связано с «приработкой» образца, характеризуемой необратимым деформированием связующего в зоне контакта с винтом, изначально поврежденного в результате монтажа самонарезающих винтов.



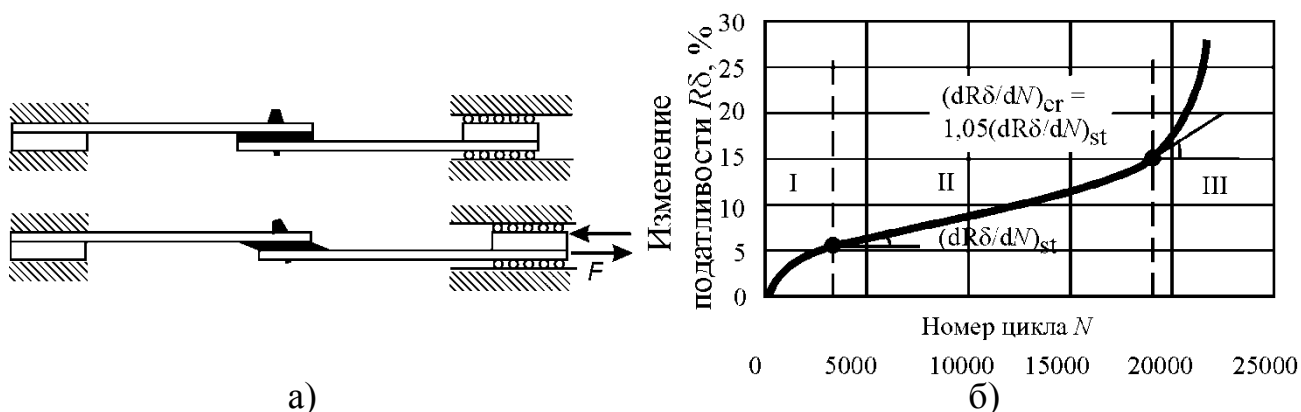


Рисунок 8 – Схема циклических испытаний (а) и пример диаграммы изменения податливости в зависимости от номера цикла (б)

Характерные зазоры, образованные в результате необратимого деформирования стеклопластика, обнаружены при микроскопическом исследовании поперечных разрезов образцов. Стационарный участок связан с вовлечением в работу большего объема стеклопластика. Участок лавинообразного увеличения податливости обусловлен возникновением и развитием трещины в самонарезающем винте, что также подтверждается результатами микроскопических исследований поперечных разрезов образцов, приведенных в диссертации.

В качестве предельного состояния образцов принято начало лавинообразного увеличения относительной податливости образцов  $R\delta(N)$ . При этом считали, что после наступления предельного состояния соединение не подлежит дальнейшей эксплуатации, т.к. его податливость начинает неконтролируемо быстро возрастать. Началом лавинообразного роста податливости принято 5% отклонение тангенса угла наклона касательной к диаграмме  $(dR\delta/dN)$  от соответствующего среднего тангенса угла наклона стационарного участка  $(dR\delta/dN)_{st}$  (рисунок 8б).

Анализ результатов испытаний свидетельствует о том, что в начале своего лавинообразного роста податливость модифицированных образцов превышает начальную на 14-16%, при этом разброс начальной податливости с учетом всех нагрузок составляет не менее  $\pm 15\%$ . Отсюда следует, что жесткость соединений можно считать постоянной до наступления предельного состояния и использовать в расчетах по методике проектирования, изложенной в главе 2.

Аппроксимация экспериментальных данных усталостной прочности (рисунок 9б) модифицированных образцов, позволяющая получить оценку предела выносливости соединений на базе  $N = 1 \cdot 10^7$  циклов (по аналогии с оценкой долговечности стального каркаса по «Нормам для расчета и проектирования механической части новых вагонов трамвая колеи 1524 мм»), получена из анализа кривых податливости в виде:

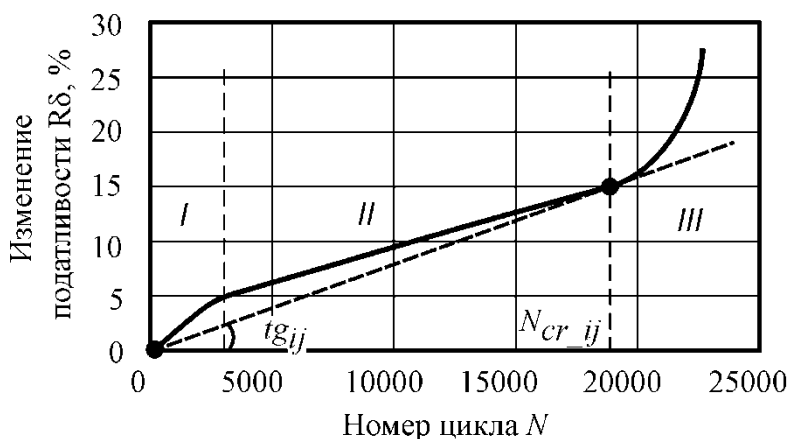
$$N(F) = \frac{15}{1,823 \cdot 10^{-15} \cdot F^{5,312}} \quad (5)$$

В основу зависимости (5) положен анализ экспериментальных диаграмм изменения относительной податливости образцов  $R\delta(N)$  (рисунок 9а). Для экс-

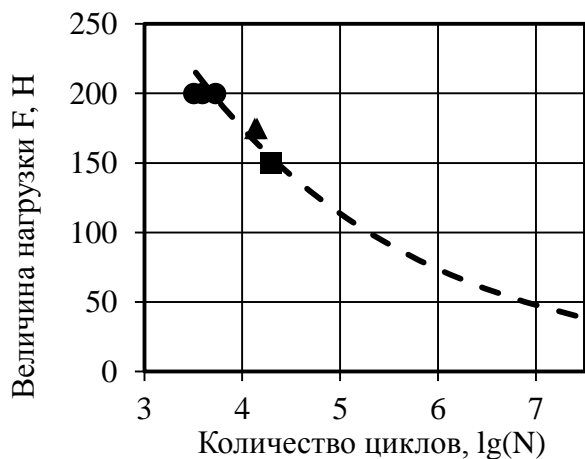
траполяции результатов испытаний в область усталостной прочности ( $N > 10^6$  циклов) принято допущение о том, что величина приращения податливости перед наступлением предельного состояния останется неизменной:

$$\Delta\delta_{cr} = R\delta(N_{cr}) - R\delta(0) = const = 15\% . \quad (6)$$

С использованием данного допущения зависимость  $N(F)$  определена при помощи тангенсов секущих прямых  $tg_{ij}$ , соединяющих начальное и предельное состояние образцов на диаграмме изменения относительной податливости (рисунок 9а). На рисунке 9в показаны значения тангенсов угла наклона секущих экспериментальных диаграмм и их аппроксимация с минимальным СКО степенной функцией в зависимости от амплитуды нагрузки при циклическом нагружении.

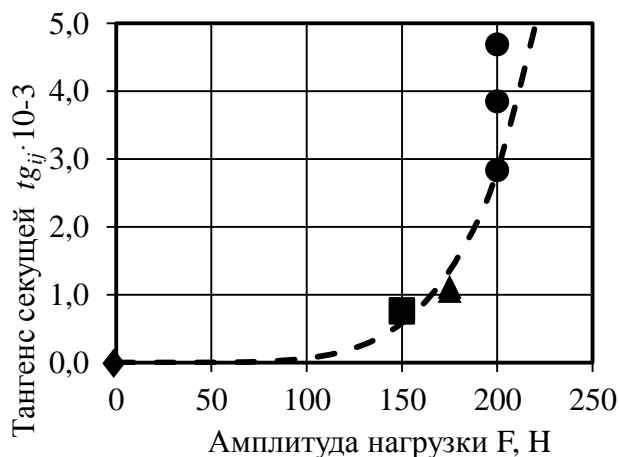


а)



— — Зависимость (5)      ● Эксп. точки 200 Н  
▲ Эксп. точки 175 Н      ■ Эксп. Точки 150 Н

б)



● Эксп. точки 200 Н      ▲ Эксп. точки 175 Н  
■ Эксп. точки 150 Н      — — Аппроксимация

в)

Рисунок 9 – Анализ диаграммы изменения податливости в зависимости от номера цикла (а); аппроксимация результатов циклических испытаний (б) и тангенсов угла наклона секущих  $tg_{ij}$  (в)

Связывание областей малоциклового и многоциклового нагружения произведено за счет учета очевидного условия равенства нулю тангенса угла

наклона  $tg_{ij}$  при нулевой амплитуде нагрузки, соответствующее отсутствию роста податливости при отсутствии нагрузки (нулевая точка на рисунке 9в).

Указанный выше предел выносливости достигается при амплитуде нагрузки  $F$ , составляющей  $\approx 50$  Н; для исходных образцов  $F \approx 12$  Н, что соответствует увеличению долговечности соединений по нагрузке более, чем в 4 раза.

Полученная зависимость (5) использована в методике проектировочного расчета клеемеханических соединений композитной обшивки и стального каркаса по критерию усталостной прочности. Отметим, что максимальная эксплуатационная нагрузка участка длиной  $p = 50$  мм (см. гл.2) составила 48 Н, то есть эксплуатация модифицированного варианта клеемеханического соединения будет надежной.

### **Дальнейшее развитие работы**

Разработанные в настоящем исследовании расчетные и экспериментальные методики и математические модели могут быть использованы как база для решения задач оптимального проектирования соединений с различным набором целевых функций и варьируемых параметров. Развитие численных моделей микроструктуры композитных элементов соединений позволит перейти от эмпирических подходов к оценке повреждений к расчетным, что позволит сократить сроки и объем испытаний, повысить достоверность результатов. Для более точной оценки долговечности каркасно-панельной конструкции в реальных условиях эксплуатации, необходимы исследования влияния гигротермальных эффектов на долговечность её компонентов, в том числе, влияния переходов через температуру замерзания воды ( $0^\circ \text{C}$ ).

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Разработана новая методика проектирования кузова каркасно-панельного транспортного средства, имеющего в составе композитные сэндвич-панели и клеемеханические соединения переменной толщины. Методика обеспечивает в условиях производства выбор переменного шага армирования механическими элементами, который позволяет компенсировать неточности изготовления и обеспечивает повышение долговечности кузова. Развита инструментальная методика комбинирования численно эффективной упрощенной (эквивалентной по жесткости балочно-оболочечной) конечно-элементной модели кузова и детализированного участка с трехмерными моделями конструктивных элементов с заданной нагруженностью. Для рассмотренной конструкции каркасно-панельного кузова трамвайного вагона обеспечение равномерного распределения жесткости по сравнению со случайным, обусловленным технологическими разбросами зазоров между панелями и каркасом (1-6 мм), дает выигрыш в долговечности основных несущих элементов в  $\sim 7,5$  раз.

2. Предложен новый способ управления жесткостью и прочностью клеемеханических соединений композитных сэндвич-панелей и стального каркаса, отличающийся применением специальных номограмм жесткости и использованием в качестве армирующих элементов самонарезающих винтов с предварительной упрочняющей обработкой технологических отверстий полимерной компо-

зицей. Разработаны номограммы погонной жесткости соединений для шага армирования в диапазоне 25-100 мм и толщины клеевого слоя 1-6 мм. Расчетами с использованием разработанных моделей показано, что варьирование шага расположения армирующих винтов клеємеханических соединений в диапазоне 25-100 мм позволяет увеличивать жесткость соединений до 4-х раз. Предварительная обработка технологических отверстий полимерной композицией позволяет увеличить долговечность соединений по нагрузке более, чем в 4 раза.

3. Разработана оригинальная конечно-элементная модель нахлесточного клеємеханического соединения, отличающаяся учетом физических и геометрических нелинейностей и наличием исходно поврежденной области у отверстий в композите после монтажа самонарезающих винтов. Модель позволяет определить напряженно-деформированное состояние всех элементов и прогнозировать диаграмму «усилие-перемещение» соединений вплоть до разрушения с достаточной для инженерных приложений точностью. Предложен новый инженерный расчетно-аналитический способ оценки многоциклового прочностного клеємеханических соединений с самонарезающими винтами с использованием информации о статической прочности и об изменении податливости соединений при проведении лишь малоцикловых испытаний.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

#### **Публикация в изданиях, входящих в базы Scopus, Web of science:**

1. Sapozhnikov, S. Transverse reinforcement of adhesive joints/ S. Sapozhnikov, A. Shakirov// Mechanics of Composite Materials. – 2015. – 51 (2). – С. 209-214

2. Shakirov A. Experimental and FE analysis of Bonded Single-lap Joints Strengthened by Self-tapping Screws/ A.A. Shakirov, S.B. Sapozhnikov, S.D. Vaulin// Proceedings of the World Congress on Engineering 2015. London, U.K. – 2015. – Т.2. – С. 456-561.

#### **Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:**

3. Сапожников, С.Б. МКЭ моделирование силовых композитных обшивок транспортных средств./ С.Б. Сапожников, А.А. Шакиров, Р.Р. Абдрахимов// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Машиностроение». – 2013. – Т.13, №2. – с. 58-62

4. Шакиров, А.А. Повышение жесткости нахлесточных клеємеханических соединений, армированных самонарезающими винтами/ А.А. Шакиров, Р.Г. Халилова, С.Б. Сапожников// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Машиностроение». – 2014. – Т.14, №4. – с. 30-36

5. Шакиров, А.А. Работоспособность нахлесточных клеємеханических соединений при циклическом растяжении – сжатии/ А.А. Шакиров, С.Б. Сапожников, С.В. Словиков// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Машиностроение». – 2015. – Т.15, №4. – с. 70-79

6. Шакиров, А.А. Повышение весовой эффективности гибридных каркасно-панельных кузовов за счет соединений с управляемой сдвиговой жесткостью / А.А. Шакиров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 5–14