

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи



Шакиров Александр Александрович

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

Специальность: 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов  
и детали машин

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Доктор технических наук,  
профессор С.Б. Сапожников

Челябинск 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Состояние вопроса, задачи исследования .....	11
1.1 Концепции проектирования высоконагруженных кузовов наземных длинномерных транспортных средств .....	11
1.2 Соединения волокнистых полимерных композитных материалов и металлов .....	24
1.3 Методы оценки многоциклового усталости на основе кратковременных испытаний .....	36
1.4 Влияние климатических факторов на работоспособность клеемеханических соединений .....	37
1.5 Формулировка цели и задач исследования. ....	40
Глава 2. Методика проектирования каркасно-панельного кузова с макрогеометрическими отклонениями .....	41
2.1 Анализ напряженно-деформированного состояния каркасно- панельной конструкции с переменными зазорами между панелями и каркасом. .....	41
2.2 Способ управления жесткостью клеевых соединений каркасно- панельного кузова. ....	52
2.3 Методика проектирования каркасно-панельной конструкции .....	56
2.4 Расчетно-экспериментальное исследование элементов конструкции каркасно-панельного кузова с применением МКЭ и масштабных макетов .....	63
2.5 Выводы по главе.....	69
Глава 3. Расчетно-экспериментальный анализ механического поведения клеемеханических соединений с композитными элементами, при квазистатическом нагружении до разрушения .....	72

3.1 Экспериментальное исследование механических характеристик элементов нахлесточных соединений .....	72
3.2 Расчетно-экспериментальный анализ механического поведения клеемеханических соединений с композитными элементами при квазистатическом нагружении.....	87
3.3 Разработка МКЭ-модели клеемеханического нахлесточного соединения, армированного самонарезающими винтами .....	93
3.4 Выводы по главе.....	98
Глава 4. Инженерная методика оценки долговечности клеемеханических соединений, армированных самонарезающими винтами .....	100
4.1 Способ повышения долговечности клеемеханических соединений, армированных самонарезающими винтами .....	100
4.2 Экспериментальное исследование механического поведения клеемеханических соединений при циклическом нагружении.....	102
4.3 Инженерная методика оценки ограниченной долговечности клеемеханических соединений, армированных самонарезающими винтами ..	110
4.4 Выводы по главе.....	115
Заключение .....	116
Список литературных источников .....	118
Приложение А .....	138
А.1 Конечно-элементная модель кузова низкопольного трамвайного вагона.....	138
А.2 Конечно-элементная модель типовой панели.....	143
А.3 Конечно-элементная модель клеемеханического нахлесточного соединения при квазистатическом нагружении.....	145
Приложение Б.....	148
Б.1 Результаты испытаний макетов каркасно-панельной конструкции..	148

Б.2 Результаты испытаний на жесткость механических соединений с самонарезающими винтами .....	152
Б.3 Результаты испытаний образцов клеємеханических соединений при циклическом нагружении .....	154
Приложение В.....	163

**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 клеемеханических 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 клеемеханических 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 клеемеханических 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 клеемеханическими соединениями типа «композит-сталь» на основе низкомодульных 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 транспортного средства 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, 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 образования 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.

## ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В главе представлены результаты анализа научных литературных источников по теме диссертационной работы, позволяющие обосновать её актуальность и научную новизну, сформулировать цели и задачи диссертационного исследования.

### **1.1 Концепции проектирования высоконагруженных кузовов наземных длинномерных транспортных средств**

В работе рассмотрены наземные транспортные машины, имеющие длину кузова более 10 м и предназначенные для пассажирских перевозок. Указанные габариты имеют большинство многоместных автобусов, троллейбусов, железнодорожных вагонов, а также вагонов трамвая, метро и других видов рельсовых транспортных средств.

#### **1.1.1 Современные требования к конструкциям транспортных средств и перспективные материалы в транспортном машиностроении**

К современным изделиям транспортного машиностроения предъявляются повышенные требования по экономичности, весовой эффективности, технологичности, надежности и внешнему виду.

Топливная, энергетическая экономичность транспортных средств является одним из основных критериев эффективности их эксплуатации. При этом масса самого транспортного средства непосредственно влияет на его экономичность: для железнодорожных поездов снижение массы на 1% позволяет снизить энергопотребление на 0,5% [1]; для автомобилей – на 0,7-0,8% [2-5]. Таким образом, на преодоление потерь, связанных с весом отмеченных транспортных средств тратится до 50-75% их топлива (или электроэнергии) [6].

Топливная экономичность также необходима для снижения выбросов в атмосферу ряда вредных веществ, содержащихся в выхлопе силовых установок внутреннего сгорания. Существуют различные международные программы по снижению выбросов парниковых газов в атмосферу, например, Киотский

протокол [7], подписанный, в том числе, Российской Федерацией, и Европейская программа по снижению выбросов углекислого газа в атмосферу [8].

Весовая эффективность способствует уменьшению инерционных нагрузок и сил сопротивления в процессе эксплуатации транспортных средств, что приводит не только к улучшению топливной экономичности, но и к увеличению безопасности, улучшению таких важных функциональных характеристик, как тягово-скоростные свойства и управляемость [1, 9, 10].

Еще одной важной характеристикой транспортного средства является стоимость его жизненного цикла [9, 11]. В основном, она формируется за счет себестоимости эксплуатации и изготовления. В связи с этим, повышение технологичности, экономически оцениваемое с помощью технологической себестоимости изготовления, является важным требованием современного транспортного машиностроения. В состав технологической себестоимости входят стоимость материалов, труда, энергоресурсов, доля стоимости инструмента и оборудования, необходимых для процесса изготовления и др. [2, 12].

Экономическая сторона процесса эксплуатации – второй составляющей стоимости жизненного цикла, предъявляет требования к высокой надежности и ремонтпригодности изделий [9, 11], а также заставляет искать внешний облик, характеризующийся высоким аэродинамическим совершенством и эстетичностью [13-15].

Существуют различные решения, позволяющие достигать указанных выше требований за счет замены традиционных углеродистых сталей в несущих элементах кузова на перспективные материалы, обладающие лучшими технологическими и эксплуатационными свойствами.

В таблице 1 показано сравнение перспективных конструкционных материалов, используемых в автомобилестроении, включая композиты и металлы. Как видно из таблицы, наилучшим отношением «снижение массы/относительная стоимость» обладают магний, алюминий, стеклопластик и нержавеющая сталь. Использование отмеченных материалов, в среднем, позволяет снизить массу изделий на 20-30% при увеличении себестоимости изготовления в 1,5-1,7 раз.

Таблица 1 – Сравнение основных конструкционных материалов, используемых в автомобилестроении [16, 17]

Материал	Заменяемый материал	Относительное снижение массы (%)	Относительная стоимость* (долей)
Углеродистая сталь	–	–	1
Высокопрочная сталь ( $\sigma_B > 550$ МПа)	Мягкая сталь	10-25	1,15
Алюминий	Углеродистая сталь, чугун	40-60	1,3-2,0
Магний	Углеродистая сталь, чугун	60-75	1,5-2,5
Стеклопластик	Углеродистая сталь	25-35	1-1,5
Углепластик	Углеродистая сталь	50-60	2-10
Титан	Легированная сталь	40-55	1,5-10
Нержавеющая сталь	Углеродистая сталь	20-45	1,2-1,7

\* Из допущения о крупносерийном производстве (60 000 шт./год)

Сравнение механических характеристик перспективных конструкционных материалов показано в таблице 2.

Настоящая диссертационная работа посвящена проблемам применения конструкционных композитных материалов – стеклопластиков, которые обладают рядом важных преимуществ по сравнению с другими отмеченными перспективными материалами:

- наряду с нержавеющей сталью их применение требует наименьших затрат (таблица 1);
- являясь полимерным композитным материалом, стеклопластик имеет дополнительные преимущества относительно нержавеющей стали [4, 5]: на 40-60% менее дорогостоящая оснастка для изготовления изделий, повышенные виброизоляционные характеристики, повышенное энергопоглощение при нагружении до разрушения, что важно для обеспечения безопасности пассажиров при возникновении аварийных ситуаций.

Таблица 2 – Механические характеристики конструкционных материалов, используемых при изготовлении наземных транспортных средств [5, 17-19]

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности, МПа
Сталь 20 (прокат)	7800	210	410
АМг 5 (алюминиевые прессованные профили)	2650	71	255
AZ61 (магниевые прессованные профили)	1800	44	350
Тканевый стеклопластик (псевдоизотропная укладка)	1500	18	310
Тканевый углепластик	1100	37	504
Хаотически армированный стеклопластик	1550	11	210

Наибольшее распространение среди силовых конструкций из композитных материалов, применяемых в области транспортного машиностроения, получили конструкции, использующие сэндвич-панели [1,5, 21-24].

Сэндвич-панель традиционно состоит из двух композитных обшивок толщиной  $t_{fi}$ , между которыми размещается низко модульный наполнитель толщиной  $t_c \gg t_{fi}$  (рисунок 1). При изгибе панелей основным видом деформирования наполнителя, обеспечивающим совместную работу несущих слоев, является сдвиг. Композитные обшивки при этом подвергаются растяжению/сжатию. При нагружении сосредоточенными силами в направлении, перпендикулярном срединной поверхности панели, наполнитель сжимается или растягивается в этом направлении, а обшивки локально изгибаются.

Широкое распространение сэндвич-панелей обусловлено их высокой несущей способностью, долговечностью и жесткостью по сравнению с традиционным каркасным или оболочечным исполнением. Кроме того, они сочетают в себе не только несущие, но и функциональные свойства: хорошую звуко- и теплоизолирующую способность, высокий коэффициент внутреннего поглощения энергии, невысокую трудоемкость изготовления и сборки вследствие

меньшего числа деталей по сравнению с обычными конструкциями [24-25]. Невысокая трудоемкость сборки является одним из определяющих преимуществ при мелкосерийном производстве.

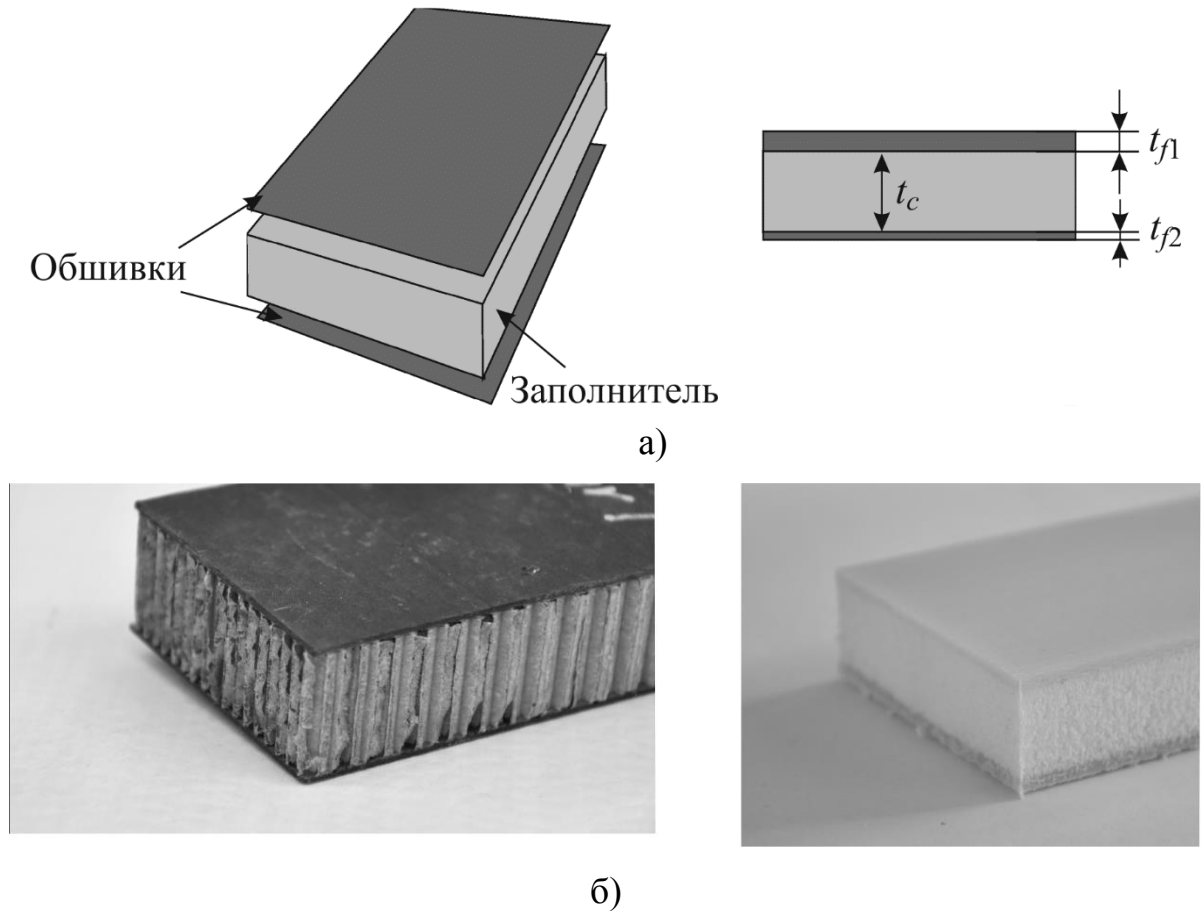


Рисунок 1 – Строение (а) и примеры (б) сэндвич-панелей [1]

### 1.1.2 Обзор концепций исполнения длинномерных кузовов пассажирских транспортных средств

Кузова транспортных средств принято разделять на несколько групп по различным признакам. В данной диссертационной работе кузова удобно классифицировать по типу конструкции и нагруженности (рисунок 2)



Рисунок 2 – Классификация кузовов наземных транспортных средств [9]

**Каркасные кузова.** Каркасные кузова являются исторически первыми кузовами транспортных средств. В большинстве случаев они представляют собой сварные конструкции из стальных и алюминиевых профилей различного поперечного сечения [9-10, 26-30]. Как было отмечено выше, каркасные кузова могут быть разделены на разгруженные, полунесущие и несущие.

Разгруженный каркасный кузов не имеет жесткого соединения с рамой. Он устанавливается на раме на упругих подушках и кроме веса пассажиров и перевозимого груза никаких других нагрузок не воспринимает. Разгруженные кузова (кузов на шасси) характерны для пассажирских автобусов (рисунок 3) [30-33].

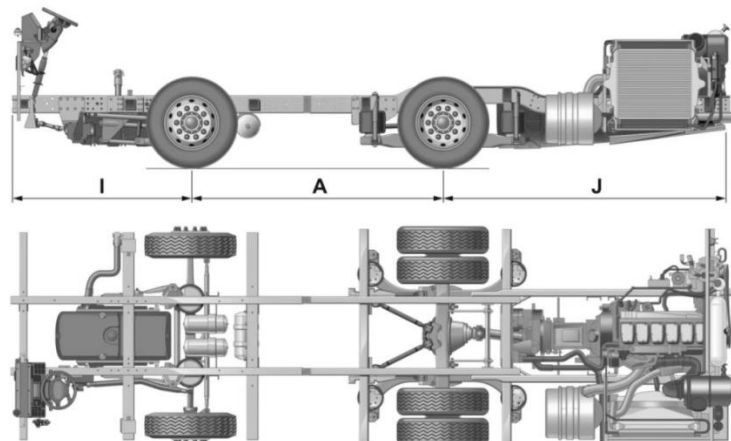


Рисунок 3 – Шасси автобуса Scania [31]



При разгруженном кузове автобус может быть скомпонован из шасси (включая раму, силовую установку, основные устройства автобуса) и кузова разных марок. Тем самым реализуется более гибкий подход к требованиям рынка, чем у полунесущих или несущих кузовов, хотя, последние и позволяют обеспечить лучшую удельную несущую способность конструкции.

Полунесущие и несущие кузова на данный момент являются наиболее распространенными типами кузовов наземных транспортных средств, начиная с автобусов [9, 30, 34-39] (рисунок 4а), вагонов трамвая [40-43], и заканчивая иными видами рельсовых транспортных средств [43] (рисунок 4б).

Каркас кузова подразделяется на раму пола, боковины и крышу. Отмеченные составные части каркаса свариваются на отдельных стапелях и затем собираются на общем стапеле в единую несущую конструкцию.

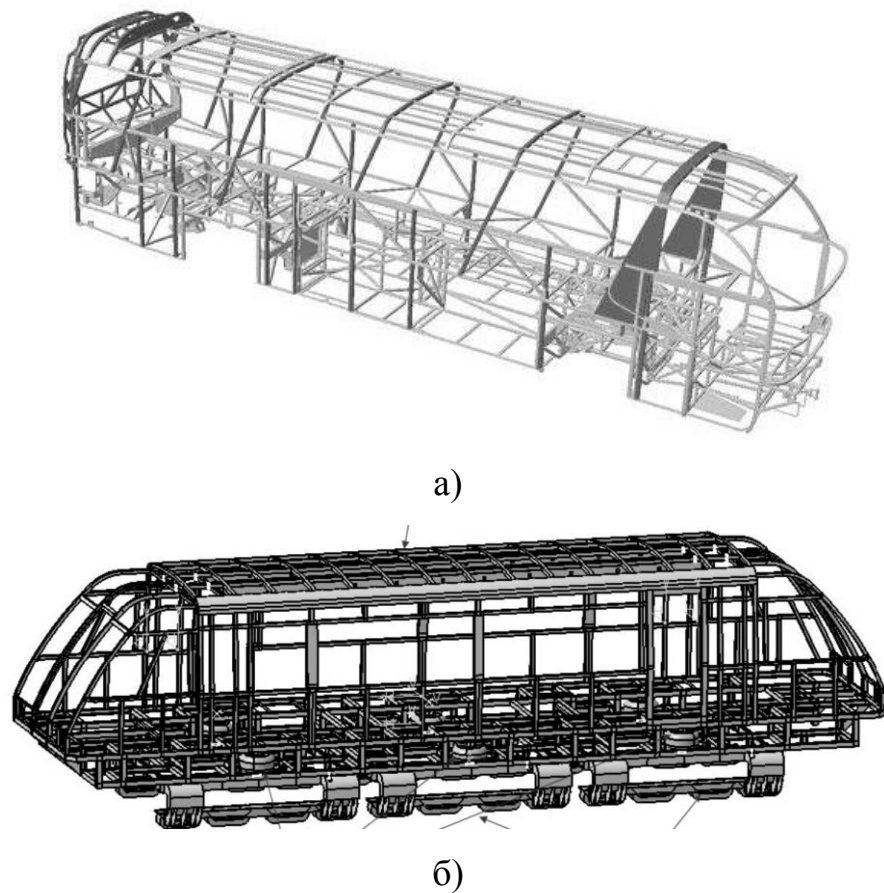


Рисунок 4 – Несущие каркасы автобуса (а) и секции вагона на магнитной подушке (б) [43]

Каркасные кузова имеют несущую обшивку в виде алюминиевых, стальных или композитных листов/панелей, соединенных с каркасом заклепками, сваркой либо при помощи клеевых соединений.

В настоящее время распространены так называемые гибридные каркасы кузовов, совмещающие в себе несущие трубы, профили из традиционных конструкционных углеродистых сталей и перспективных материалов, например, алюминия [42, 43] и нержавеющей стали [40, 41].

**Бескаркасные кузова.** Бескаркасные кузова представляют собой самонесущие оболочки (монококи), чаще всего изготавливаемые в виде сэндвич-панелей (см. п. 1.1.1) с обшивками из перспективных материалов: алюминий, магний, композиты, нержавеющая сталь.

Сэндвич-панели алюминиевых и магниевых кузовов формируются при помощи продольной сварки экструдированных (прессованных) профилей [20, 44-46], как показано на рисунке 5.

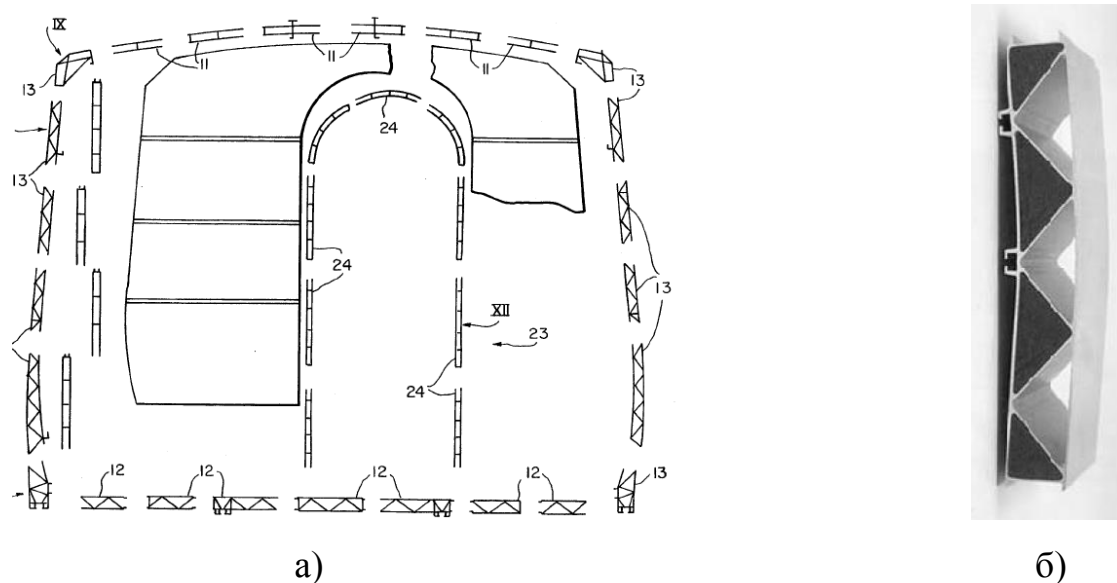


Рисунок 5 – Бескаркасный кузов (а) [44], изготавливаемый из прессованных алюминиевых профилей (б)

Для снижения остаточных температурных деформаций собранного кузова используется сварка трением с перемешиванием [47]. Рамы пола таких кузовов имеют традиционное каркасное или каркасно-панельное исполнение, что

обусловлено наличием значительных локальных нагрузок в зонах взаимодействия с тележками, а также тем, что рама пола воспринимает основную часть продольных нагрузок от взаимодействия между вагонами. Отмеченные кузова распространены среди высокоскоростных поездов и обладают значительной удельной несущей способностью.

Бескаркасные конструкции из композитных сэндвич-панелей нашли свое применение в несущих кузовах и шасси автобусов [23, 48-50] (рисунок 6), вагонах метро [52] и других легкорельсовых транспортных средств [53].



Рисунок 6 – Бескаркасный кузов автобуса [23]

В качестве композитного материала сэндвич-панелей используется стеклопластик [23, 52] (в близких к промышленному производству конструкциях), а также углепластик [50, 53] (в некоторых концептуальных разработках). В качестве заполнителя сэндвич-панелей боковин и крыши используются пенопласты, бальзовое дерево; в нагруженных конструкциях пола – алюминиевый сотовый заполнитель [23].

Бескаркасные кузова превосходят полукаркасные и каркасные в удельной несущей способности, однако требуют существенной модернизации и

удорожания производства. Кроме того, возникают проблемы с ремонтпригодностью таких кузовов, так как восстановление целостности несущей оболочки на кузове без ухудшения её несущей способности и внешнего вида требует значительных трудозатрат.

**Полукаркасные кузова.** Полукаркасные кузова имеют только некоторые части каркаса (отдельные стойки, дуги, усилители и т.д.), соединенные между собой несущей обшивкой [9, 27-28].

Основным преимуществом полукаркасных кузовов над каркасными является возможность совместить функциональные и несущие свойства в обшивке, что позволяет дополнительно увеличить удельную несущую способность конструкции.

Указанное преимущество делает их привлекательными для применения перспективных материалов в их составе, что позволяет дополнительно снизить массу кузова транспортного средства.

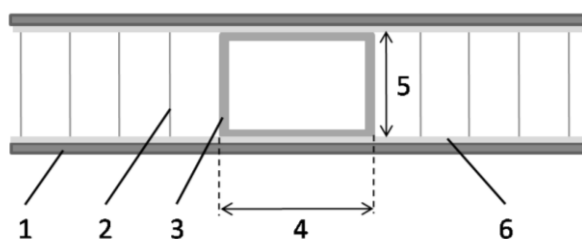
В частности, полукаркасные кузова являются стандартом для российского железнодорожного транспорта [12, 19, 27-28]. Традиционная конструкция состоит из гофрированной обшивки, подкрепленной системой стоек, дуг и стрингеров боковин и крыши, а также поперечных и продольных балок рамы пола. При этом, распространен вариант замены продольных балок пола гофрированной обшивкой.

В современных отечественных пассажирских вагонах углеродистая сталь гофрированной обшивки боковин заменена на нержавеющую [54]. Имеются образцы полностью алюминиевых либо гибридных вагонов с рамой из углеродистой стали и обшивками из алюминия [28, 55]. Вагоны с использованием в несущих частях кузова алюминия показали снижение массы около 40% при тех же прочностных характеристиках [28].

Широко распространена концепция каркасно-панельного кузова, построенного на основе сэндвич-панелей (см. п. 1.1.1), усиленных подкрепляющим каркасом. В подавляющем большинстве случаев такие каркасы собираются из разнородных материалов: каркас является металлическим, сэндвич-панели имеют композитные либо стальные/алюминиевые обшивки [56-

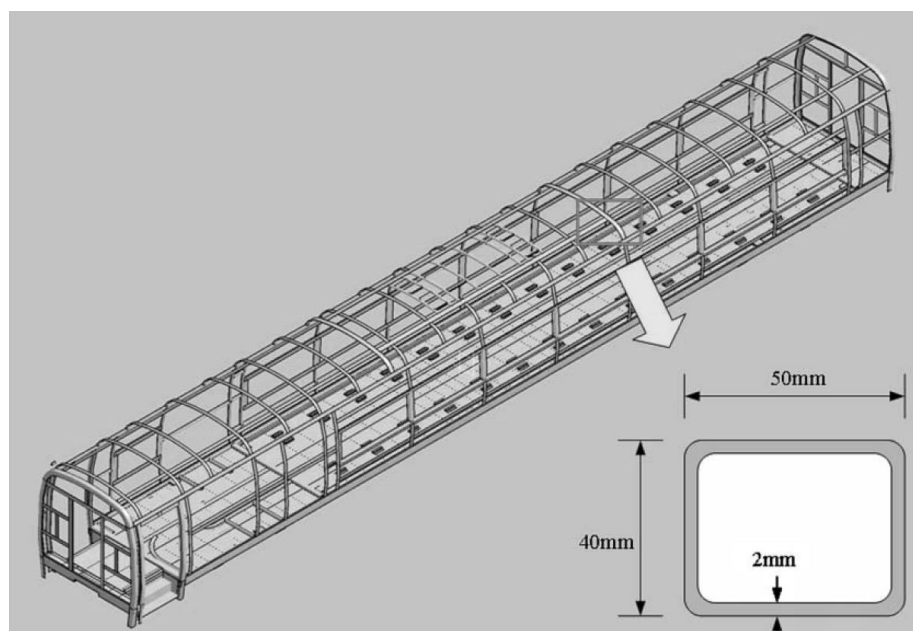
60]. При этом, как показал анализ литературы, более распространены сэндвич-панели с композитными обшивками.

Конструкции гибридных кузовов из сэндвич-панелей с композитными обшивками имеют схожее строение: на металлическую раму пола устанавливаются боковины и крыша, состоящие из сэндвич-панелей, подкрепленных в зонах дверных проемов и окон металлическими стрингерами и шпангоутами. В большинстве случаев трубы подкрепляющего каркаса располагаются между обшивок сэндвич-панелей перед их отверждением в процессе изготовления кузова (рисунок 7).



1 – композитная обшивка; 2 – наполнитель (сотовый, либо пенообразный); 3 – подкрепляющий каркас; 4,5 – габаритные размеры трубы каркаса; 6 – клеевая композиция

а)



б)

Рисунок 7 – Боковина в разрезе (а) и подкрепляющий каркас (б) каркасно-панельного кузова

Отмеченные каркасно-панельные конструкции с композитными несущими обшивками характерны для вагонов высокоскоростных поездов [61-62], метро [63], трамвая и иных видов легкорельсового транспорта [64-65]. Следует отметить их низкую ремонтпригодность, обусловленную теми же причинами, что и у бескаркасных кузовов: восстановление целостности несущей оболочки непосредственно на конструкции без ухудшения её несущей способности и внешнего вида требует значительных трудозатрат.

Также существует вариант клеивания панелей обшивки в каркас по аналогии с элементами автомобильного остекления [66] (рисунок 8).

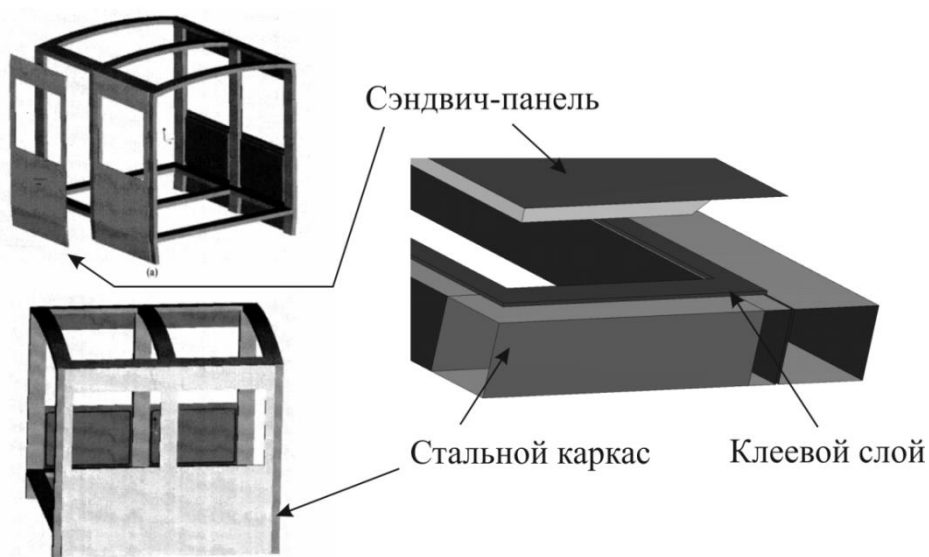


Рисунок 8 – Вклейка сэндвич-панелей в стальной каркас по аналогии с автомобильным остеклением

Данный вариант представляет интерес для дальнейших исследований, так как, имея преимущества предыдущей концепции каркасно-панельного кузова, он не требует значительного переоснащения производственной базы, ориентированной на мелкосерийное изготовление стальных каркасных длинномерных кузовов. Кроме того, он позволяет обеспечить модульность конструкции за счет использования типовых сборочных единиц – модулей обшивки, сочетающей в себе не только силовые, но и функциональные свойства (звуко-, теплоизоляция). Это существенно повышает технологичность и

ремонтпригодность изделия: отказавшую панель достаточно легко заменить новой без снижения несущей способности и ухудшения качества экстерьера кузова. Соединения между панелями и каркасом, получаемые в результате отмеченного процесса вклеивания, могут быть классифицированы как нахлесточные

Следует отметить, что в случае использования в каркасе экономичных горячекатаных труб, например, по ГОСТ 8645-68 [67], а также возникновения тепловых деформаций при сварке [68-70], кузов приобретает отклонения от идеальной проектной геометрии, которые согласно анализу конструкторской документации на реальный каркас трамвайного вагона могут достигать 1-6 мм [71]. Эта особенность ранее не учитывалась в методиках проектирования, что требовало либо изготовления относительно точного, но дорогостоящего каркаса (например, из композитных профилей [72]), либо проведения трудоемких операций правки каркаса или применения технологии монтажа обшивок из цельнотянутого листа, компенсирующих местные несовершенства [73, 74]. Пластические деформации и микротрещины после правки неконтролируемо снижают долговечность конструкции транспортного средства.

Отмеченная проблема требует разработки новых концепций каркасно-панельных кузовов, в которых переменные зазоры между панелями и стальным каркасом могли бы быть компенсированы при помощи нахлесточных соединений (типа «композит-сталь») с клеевым слоем переменной толщины. При этом, переменная толщина клея, в свою очередь, порождает проблему неравномерности распределения нагрузок в каркасе, вызывая снижение его долговечности, что требует разработки новых методов управления жесткостью и прочностью клеевых соединений. В связи с этим в подразделе 1.2 проведен анализ соответствующей научной литературы.

### **1.1.3 Методики проектирования и расчета кузовов транспортных средств.**

Длинномерный кузов наземного транспортного средства представляет собой статически неопределимую механическую систему, состоящую

преимущественно из оболочек и профилей. В связи с ростом вычислительных возможностей электронных устройств, на замену классическим аналитическим методам расчета усилий и напряжений в стержневых и оболочечных конструкциях [19, 24-25, 75] пришли численные, в частности, метод конечных элементов (МКЭ) [21, 31-33, 35-39, 43, 48, 51-53, 59, 63]. Для моделирования профилей используются как балочные, так и оболочечные конечные элементы [31-33, 35-37, 39, 43]; для моделирования несущей обшивки и трехслойных конструкций – оболочечные [48, 51-52, 63-64]. Во всех рассмотренных работах использовалась идеальная проектировочная геометрия без учета возможных технологических отклонений и дефектов.

## **1.2 Соединения волокнистых полимерных композитных материалов и металлов**

Существует несколько основных типов конструкционных соединений полимерных композитных материалов и металлов: механические, клеевые, клеемеханические. Их общей особенностью является то, что в состав соединения входят разнородные материалы, имеющие существенно отличающиеся механические характеристики [82]. Полимерные композитные материалы имеют анизотропную природу, обусловленную наличием высокопрочных волокон, определенным образом ориентированных в изотропном, значительно менее прочном связующем. Взаимодействие отмеченных компонентов в композитном материале приводит к таким нетипичным для металлов механизмам разрушения, как расслоения, а также иные повреждения связующего при сохранении целостности волокон [18], которые необходимо учитывать при проектировании и расчете соединений.

### **1.2.1 Особенности композитных материалов и их влияние на прочность соединений.**

Для соединений с механическими элементами характерны отказы, вызванные, в основном, разрушением композитного материала. Принято выделять четыре основных механизма разрушения композитного материала при



взаимодействии с механическими элементами [76-80]: разрыв по ослабленному сечению; срез отверстия; сегментация отверстия; смятие отверстия.

Для клеевых соединений кроме разрушения клеевого шва характерен отказ путем расслаивания полимерного волокнистого композита за счет действия высоких отрывных напряжений на краях нахлеста [77, 81].

В обоих случаях оценка прочности и расчет напряженно-деформированного состояния композита обычно производятся при помощи инструментария механики анизотропных материалов, а также соответствующих критериев [18, 82], учитывающих различные компоненты полей напряжений, деформаций в материале, а также различные механизмы разрушения. Распространены критерии Хашина [83], LaRC04 [84], Ямады-Сана [84-86], Цая-Бу [87] и др. Отмеченные критерии подставляются в условия предельного состояния композитных элементов соединений, которые могут быть сформулированы с использованием теории локальных или осредненных напряжений [88, 89], накопления повреждений [76], предельного равновесия [90], механики разрушения [91-93] и др.

### **1.2.2 Клеевые соединения.**

В настоящее время клеевые соединения начинают преобладать по объему применения в композитных конструкциях над более традиционными механическими соединениями. В первую очередь, это обусловлено их преимуществами, в числе которых отсутствие концентраторов напряжений в виде отверстий под механические элементы, более равномерная передача нагрузки, а также возможность соединять изделия практически любой формы [81, 94, 95].

Любое клеевое соединение можно разделить на несколько основных компонентов (рисунок 9): склеиваемые элементы, клеевой шов и граничная поверхность клеевого шва, непосредственно контактирующая со склеиваемыми элементами.

Наиболее важными факторами, которые должны быть учтены при проектировании клеевых соединений, являются [81, 94, 95]:

- укладка и механические характеристики слоев композитного материала, механические характеристики клеевого шва;
- степень подготовленности поверхностей к склеиванию;
- геометрические параметры: тип соединений, форма клеевого шва.

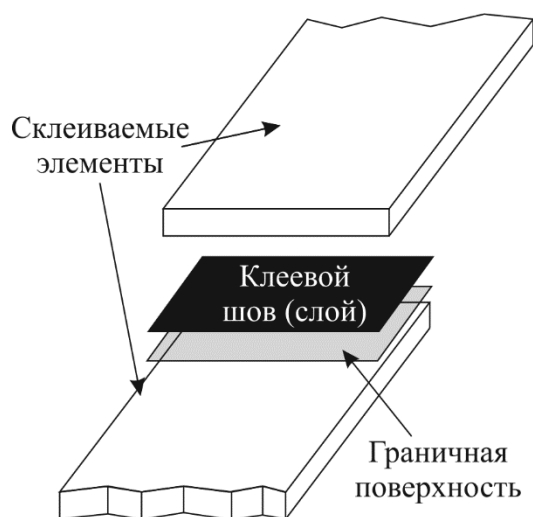


Рисунок 9 – Элементы клеевого соединения

Учет укладки и механических характеристик слоев композитного материала показан в пункте «Особенности композитных материалов и их влияние на прочность соединений».

Клеевые композиции имеют значительный разброс механических характеристик по прочности ( $\sigma_B \approx 1 \dots 100$  МПа) и жесткости ( $E \approx 1 \dots 5000$  МПа) [87, 101, 102]. Их принято делить на две группы: жесткие и эластичные. Первые отличаются преимущественно линейной диаграммой деформирования, вторые имеют существенно нелинейное механическое поведение. К мягким клеевым композициям относят полиуретановые и силиконовые. К жестким – эпоксидные, акриловые, полиимидные и др. Яркие представители группы жестких клеев имеют предельную деформацию при разрушении до 5%, эластичных – более 100%.

Общая тенденция такова, что с увеличением значений предела прочности и модуля упругости клеевая композиция все более проявляет свойства жесткой. В связи с этим наиболее распространены соединения на основе жестких клеевых

композиций – они позволяют обеспечить требуемую несущую способность высоконагруженных композитных конструкций, используемых в авиакосмической отрасли, наземном и водном транспортном машиностроении [81, 96].

Разрушение жестких клеевых композиций в большинстве случаев происходит путем образования трещины в результате слияния микропор и ее дальнейшего распространения от краевых зон нахлесточного соединения. В случае, если разрушение соединения происходит на граничной поверхности (см. рисунок 9), его называют адгезионным, если по клеевому шву – когезионным.

Учет разрушения клеевого шва путем образования и разрастания трещин производится за счет использования математического аппарата механики разрушения [97,98] и связанных с ней моделей когезионных зон (нелинейный закон сопротивления относительно скольжению или разделению двух поверхностей в зависимости от величин компонентов напряженного состояния) [99-102]. Также используются более простые критерии возникновения трещины, основанные на эквивалентных напряжениях или потенциальной энергии упругого деформирования. При этом, в качестве предельного состояния может быть принято достижение критических значений эквивалентных напряжений или энергии деформирования в какой либо точке (сингулярные критерии) [81, 103] или области с характерным размером, предварительно подобранным при калибровочных испытаниях (усредняющие критерии) [105]. Для ярко выраженных представителей группы эластичных клеев применяются отмеченные простые критерии прочности, использующие критическую энергию деформирования либо эквивалентные напряжения [81, 105], а также модели гиперупругого материала [106].

В связи с отмеченными особенностями для жестких клеев отмечается высокая чувствительность к дефектам и соответствующие проблемы в соединениях со сравнительно толстыми клеевыми швами (более 0,3-0,5 мм). Эластичные клеи, хотя и могут заполнять значительные зазоры, согласно своему

определению не имеют возможности передавать существенные нагрузки через соединения [81, 96].

Для повышения трещиностойкости жесткого клеевого шва используются различные модифицирующие добавки, например, углеродные наноструктуры [107, 108], частицы различных резин (на основе силикона, акрила) [109, 110], конструкционные барьеры для распространения трещин в виде относительно коротких участков эластичного (например, полиуретанового) клеевого шва [111], рифления склеиваемых материалов в области нахлеста [112].

Технологические процессы подготовки поверхностей к склеиванию играют определяющую роль в формировании несущей способности и долговечности клеевого соединения [81, 113, 114]. Корректная подготовка позволяет избежать адгезионного механизма разрушения соединения. Для улучшения адгезии клеевого шва применяется рифление поверхностей склеиваемых металлических элементов в зонах нахлеста.

Для наиболее технологичных одно- и двухнахлесточных соединений характерно наличие концентраторов напряжений на концах нахлеста, что способствует возникновению высоких отрывных напряжений, которые могут приводить к адгезионному разрушению соединения либо расслаиванию композита в соответствующей области. Отмеченный эффект наиболее ярко проявляется в соединениях типа «композит-металл» [77].

С целью снижения указанного эффекта концентрации напряжений были разработаны иные типы геометрии, наиболее распространенными из которых являются нахлесты с косым или ступенчатым стыком. Кроме того, исследователями разработаны приемы, снижающие отрывные напряжения в одно- и двухнахлесточных соединениях. Они характеризуются локальным изменением формы клеевого шва на торцах нахлеста (создание фасок), которое способствует плавному изменению жесткости компонентов соединения и благоприятному перераспределению напряжений [81, 115-117]. Ту же цель преследует комбинирование жесткой клеевой композиции в центре и эластичной – по краям [118-119].

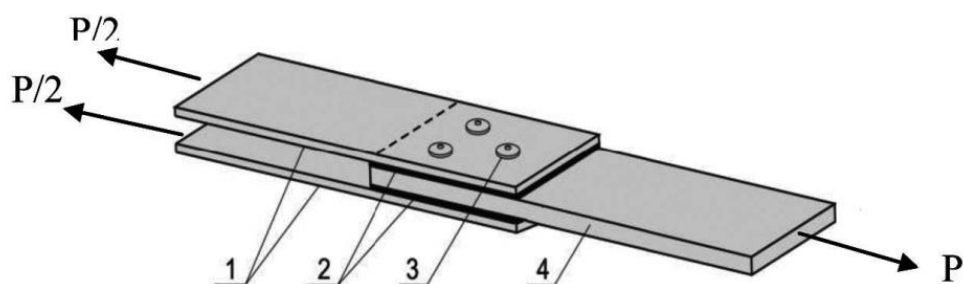
Ввиду сложности анизотропной структуры композитного материала, множества возможных механизмов разрушения, накопления повреждений и необходимости применения аппарата нелинейной механики разрушения, наиболее распространены в настоящее время расчеты соединений с использованием метода конечных элементов [94, 99-104].

При этом в проектировании активно используются аналитические методы, позволяющие с достаточной точностью определять напряженно деформированное состояние клеевых соединений и проводить первоначальную оценку их прочности [77, 81].

### 1.2.3 Клеемеханические соединения.

Как было отмечено выше, в нахлесточных (равно как и в Т-образных) клеевых соединениях возникают значительные отрывные трансверсальные напряжения, создающие благоприятные условия для развития и распространения трещин в клеевых композициях, расслаивания композитных элементов или разрушения по границе раздела между клеевым швом и композитом (адгезионное разрушение).

Для увеличения несущей способности клеевых соединений в трансверсальном направлении рационально их армировать при помощи механических элементов (болтов, заклепок, штифтов и т.д) – см. рисунок 10.



1 – стальные пластины; 2 – клеевой слой; 3 – армирующие элементы (заклепки);  
4 – композитная пластина

Рисунок 10 – Пример клеємеханического соединения

Использование трансверсально армирующих элементов приводит к следующим положительным эффектам:

- снижаются максимальные значения отрывных напряжений в клеевом слое на торцах соединения [120-125];
- в случае применения болтов и вытяжных заклепок возникают остаточные трансверсальные сжимающие напряжения, дополнительно повышающие прочность при действии отрывных напряжений [122, 126, 127];
- в случае возникновения трещин и разрушения клеевого слоя, армирующие механические элементы не позволяют реализоваться наиболее опасному сценарию разрушения соединения путем распада на независимые части и продолжают воспринимать как отрывную, так и сдвиговую части нагрузки [128-131].

Благодаря указанным эффектам, статическая прочность клеемеханических соединений (как нахлесточных, так и Т-образных) возрастает на 10-40% [130-132] в случае применения болтовых и заклепочных элементов, а в случае штифтовых – до 70-80% [123, 133]. Многоцикловая прочность при этом увеличивается на 40-60% [123, 129, 134-136]. Кроме того, исследователи отмечают значительное возрастание энергии, поглощаемой при разрушении соединений (до 600%) [131, 133].

Клеемеханические соединения также имеют лучшую несущую способность по сравнению с механическими аналогами. Здесь основными положительными эффектами при использовании клеевого шва являются:

- разгрузка механических элементов за счет клеевого шва [133, 137, 138];
- снижение концентрации напряжений в области отверстий под механические элементы [126].

При проектировании клеемеханических соединений важно обеспечить равномерное распределение нагрузки между механическими элементами и клеевым швом. Исследования показывают, что главными факторами, определяющими эффективность совместной работы несущих элементов клеемеханического соединения, являются:

- сдвиговая жесткость клеевого шва, определяемая его толщиной либо модулем упругости и модулем упрочнения (в случае билинейной аппроксимации диаграммы «деформации-напряжения») [132, 137, 138];

- отсутствие/наличие зазоров в отверстиях для армирующих элементов [139].

При расчетах и моделировании клеємеханических соединений используются как аналитические [137, 140, 141], так и численные, преимущественно, конечно-элементные методы [142-146]. В подавляющем большинстве случаев потеря несущей способности клеємеханического соединения обусловлена разрушением клеевого слоя и последующим разрушением композитного материала.

При моделировании используются отмеченные выше критерии разрушения композитных материалов и клеевого слоя, модели накопления повреждений и критерии предельного состояния соединений. Механические элементы моделируются при помощи объемных конечных элементов с изотропными упругопластическими моделями материала [129, 143, 146].

Для методик проектирования конструкций, имеющих клеємеханические соединения, характерен принцип многомасштабного моделирования с применением детализированных расчетных моделей представительного участка соединения, предназначенных для изучения особенностей механического поведения, и упрощенных оболочечных моделей – для расчета конструкции в целом [145, 147].

#### **1.2.4 Особенности применения различных армирующих элементов в клеємеханических соединениях каркасно-панельного кузова транспортного средства.**

*Болтовые элементы* широко применяются в составе клеємеханических соединений благодаря своей простоте, относительной технологичности, а также безопасному механизму разрушения путем смятия отверстий (при грамотном проектировании). Тем не менее, они также имеют ряд существенных недостатков:

- значительный диаметр 4-12 мм [78, 79, 84, 86, 88, 93, 148-150], создающий существенную концентрацию напряжений и ослабление поперечного сечения композита;
- деградация механических свойств композитного материала при циклическом взаимодействии с механическим элементом в зоне отверстий, требующая введения закладных элементов;
- необходимость доступа к внутренней стороне соединения для монтажа гайки.

Последняя особенность приводит к неприемлемо низкой технологичности использования болтовых соединений в случае, если внутренняя сторона соединения находится внутри трубы каркаса кузова транспортного средства.

*Заклепочные элементы* обладают преимуществами и недостатками, аналогичными для болтов. При этом существует более технологичный вариант вытяжных заклепок, не требующий доступа к внутренней стороне соединения. Отмеченные заклепки обладают собственными недостатками, связанными с пониженной несущей способностью относительно болтов (для процесса вытяжки заклепки должны быть полыми), а также возникновения значительных трансверсальных остаточных усилий, приводящих к сжатию эластичного клеевого шва в случае соединений со значительной толщиной (до 6 мм). Отмеченные недостатки делают нерациональным их применение в соединениях типа «композит-сталь» с относительно толстыми клеевыми швами из эластичных клеевых композиций.

*Штифтовые элементы* в большинстве случаев имеют значительно меньший диаметр, чем болтовые: 0,2-0,5 мм [124, 125, 129, 133-136, 145] для металлических штифтов; 2-5 мм – для штифтов из однонаправленного композита [123, 124], что значительно снижает концентрацию напряжений в соединяемых композитных элементах.

Гладкая поверхность штифтов приводит к относительно слабой несущей способности в трансверсальном направлении (штифты вытягиваются из композитного материала при действии трансверсальных нагрузок). Для решения



этой проблемы разработаны новые конфигурации штифтов в виде скрепок [151], стрел [147], штифтов с рифленой поверхностью [134] и др. Отмеченные конфигурации обладают необходимой для применения в высоконагруженных соединениях несущей способностью.

Основным недостатком штифтовых элементов является их низкая технологичность, требующая специального дорогостоящего оборудования (ультразвуковые монтажные головки [124, 125, 129, 133-136, 145]) и отверждения совместно с изготавливаемыми композитными изделиями. Особенности технологии установки штифтов делают невозможным их эффективное применение в соединениях типа «композит-сталь».

*Винтовые элементы*, в том числе, самонарезающие винты (шурупы), обладают относительно высокой технологичностью и несущей способностью, что позволило им широко распространиться в изделиях из дерева [152, 153]. Самонарезающие винты обладают преимуществами отмеченных выше групп механических элементов:

- они технологичны и не требуют доступа к внутренней поверхности соединения;
- обладают высокой несущей способностью;
- могут иметь достаточно малый диаметр (до 2,5 мм);
- позволяют гибко регулировать трансверсальное усилие путем затяга.

Однако исследователи [77, 154-155] не рекомендуют самонарезающие винты к применению в циклически высоконагруженных соединениях полимерных волокнистых композитов. Это обусловлено локальным разрушением 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 клеемеханических соединений, что сделает их перспективными для применения в составе соединений каркасно-панельного кузова транспортных средств с переменной толщиной эластичного клеевого шва.

Одним из способов повышения долговечности клеемеханических соединений является снижение контактных напряжений за счет заполнения зазоров между винтом и стенкой отверстия в композите полимерной композицией холодного отверждения (модифицированные соединения). Эффективность указанного способа подтверждена на примере болтовых соединений в работе [156], в которой отмечается возрастание циклической прочности модифицированных соединений до 4 раз. При этом, в работе недостаточно подробно раскрыта методика проведения и методы обработки результатов испытаний. В связи с этим, в исследовании необходимо провести объективную проверку эффективности способа в случае армирования самонарезающими винтами.

Существуют различные виды самонарезающих винтов (шурупов) с потайной головкой, отличающиеся высотой и шагом резьбы (рисунок 11).

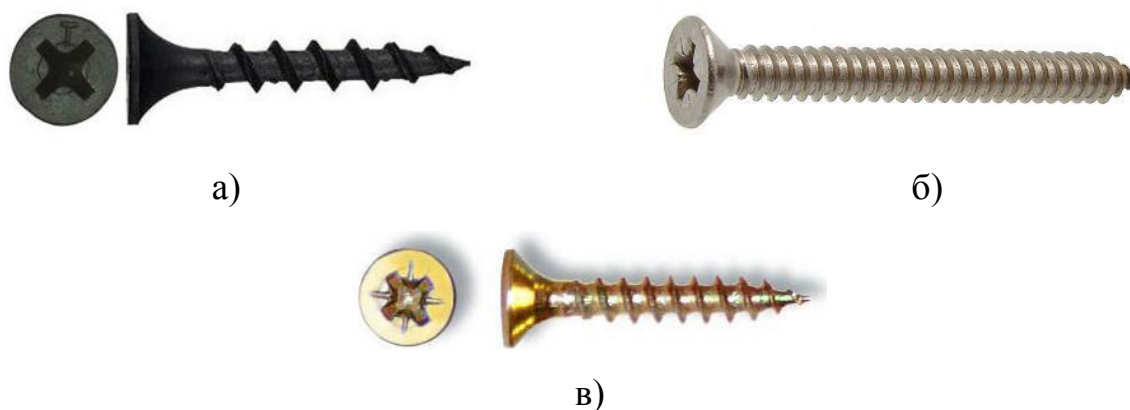


Рисунок 11 – Типы самонарезающих винтов: винты по дереву DIN 18182 с оксидированным покрытием (а); винты по металлу ISO 7050, DIN 7962 с цинковым покрытием (б); винты универсальные DIN 7962 с цинковым покрытием (в)

Наиболее распространенными видами из них являются:

- самонарезающие винты по дереву [157], имеющие резьбу с минимальным наружным диаметром  $d = 3,5$  мм и шагом  $p = 2,8$  мм;

- самонарезающие винты по металлу [158-160], имеющие резьбу по стандарту [161] с минимальным наружным диаметром  $d = 1,5$  мм и шагом  $p = 0,5$  мм;

- самонарезающие винты универсальные [162] с минимальным наружным диаметром  $d = 1,5$  мм и шагом  $p = 1,35$  мм.

Все перечисленные типы винтов могут иметь защитные покрытия (оксидированные, оцинкованные) или быть изготовленными из антикоррозионных сталей.

В составе каркасно-панельной конструкции самонарезающие винты будут применяться одновременно для стали, имеющей высокую твердость, и волокнистого композита с относительно мягкой полимерной матрицей. В связи с этим, резьба, с одной стороны, должна обладать достаточно малым углом подъема, высотой и мелким шагом, чтобы обеспечить возможность вкручивания в сталь без разрушения винта, с другой стороны – высота резьбы и её шаг должны быть достаточно крупными, чтобы обеспечить требуемую несущую способность при взаимодействии с полимерной матрицей. Отмеченным требованиям удовлетворяют универсальные самонарезающие винты [162]. Для обеспечения долговечности соединений с винтами при эксплуатации на открытом воздухе предлагается использовать винты с антикоррозионным покрытием (например, цинковым).

Существуют различные стандарты по определению механических свойств материалов винтов [163, 164], которые включают в себя типовой набор испытаний на твердость, анализ микроструктуры материала, а также испытаний на прочность при скручивании. В связи с тем, что в каркасно-панельном кузове самонарезающие винты будут работать при сдвиговых нагрузках, в рамках исследования необходимо разработать методики испытаний и провести соответствующие испытания, позволяющие получить оценки статической и циклической прочности винтов, а также соединений с их использованием.

### 1.3 Методы оценки многоциклового усталости на основе кратковременных испытаний

Методы, основанные на корреляции механических характеристик материалов при квазистатическом/малоцикловом и многоцикловом нагружении активно применяются для анализа и оценки усталостной прочности металлических элементов несущих конструкций.

В частности, развит инструментарий по подбору параметров деформационных критериев разрушения по результатам квазистатических или малоцикловых испытаний. Для уравнения Басквина-Мэнсона-Коффина [165-166] инструментарий включает в себя различные классические и современные методы: метод универсальных наклонов и четырехточечной аппроксимации [165], метод Митчелла [168], метод твердости [169], усредненный метод [170], метод нейронных сетей [171] и др.

Использование понятия микропластических деформаций, энергии пластического деформирования для оценки усталостной прочности также используется в работах [172, 173]. В этих работах указывается на единство процессов, приводящих к ограниченной выносливости и малоциклового усталости металлов.

Основным недостатком отмеченных методов является необходимость измерения при квазистатических испытаниях таких механических характеристик, как относительное сужение при разрушении  $\psi$ , истинная деформация при разрушении  $\varepsilon_f$ , сопротивление разрыву  $\sigma_f$  и др.

Автором показано (гл. 4), что основным механизмом наступления предельного состояния при циклическом нагружении клеемеханических соединений, предложенных к применению в данной работе, является разрушение стального самонарезающего винта. Сложная геометрия самонарезающих винтов [162], а также значительное влияние технологии их изготовления на прочность делают труднореализуемым получение приемлемых для инженерных расчетов оценок  $\psi$ ,  $\varepsilon_f$ ,  $\sigma_f$  и др. Требуется менее трудоемкий подход, позволяющий оценить в рамках инженерной методики ограниченную долговечность соединений на

основе кратковременных испытаний. Такой подход должен быть основан на идее связанности малоциклового и многоциклового усталости металлических материалов, доказанной в указанных выше исследованиях.

#### **1.4 Влияние климатических факторов на работоспособность клеемеханических соединений**

Еще одним аспектом, связанным с обеспечением долговечности каркасно-панельных кузовов наземных транспортных средств, является учет реальных климатических условий эксплуатации и их влияния на прочностные характеристики конструктивных элементов, в частности, клеемеханических соединений.

Наземные транспортные средства, в общем случае, работают в нестационарных климатических условиях, характеризующихся перепадами температуры, освещенности и влажности. Диапазон температур эксплуатации транспортного средства для климатического исполнения «У» (эксплуатация в условиях умеренного климата [174]) составляет от минус 45°С до плюс 45°С, диапазон уровня относительной влажности: 75-100%.

Принято объединять влияние температуры и влажности на прочность изделий из композитного материала с полимерной матрицей под одним понятием – гигротермальный эффект. Гигротермальный эффект, в основном, заключается в уменьшении температуры стеклования полимерной матрицы во влажном состоянии по сравнению с исходным (рисунок 12). При этом температура стеклования отвечает за переход полимерной матрицы из твердого состояния в вязкое, при котором несущая способность композита становится неприемлемо низкой.

В работе [76] представлен обзор исследований, посвященных влиянию гигротермальных эффектов на прочность механических болтовых и штифтовых соединений. Для изучения свойств изделий из композитов с максимально деградировавшими прочностными характеристиками под воздействием влажности их, как правило, помещают в водные ванны или климатические камеры с повышенной влажностью на срок, при котором гарантированно

достигается предельное содержание влаги в материале (предельное насыщение). Критерии предельного насыщения, а также способы измерения содержания влаги регламентированы, например, стандартом [175].

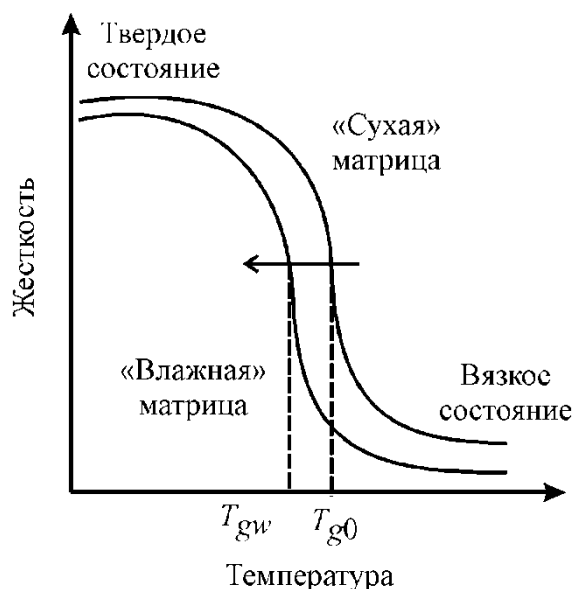


Рисунок 12 – Снижение температуры стеклования полимерной матрицы при насыщении влагой

Результаты обзора показывают разную чувствительность полимерных смол (полиимидных, эпоксидных, полиэфирных) к гигротермальному нагружению.

Полиимидные смолы отличаются повышенной стойкостью к воздействию температур, в исследовании [176] показано, что снижение статической прочности на 35% происходит для соответствующих болтовых соединений в результате термического старения на воздухе при температуре плюс 177°С в течение 415 дней.

Предельное насыщение влагой композитного материала на основе полиэстерной матрицы (выдержка в воде при температуре плюс 38°С в течение 62 дней) приводит к аналогичному 35% снижению максимальной нагрузки при квазистатических испытаниях [177].

Анализ механических характеристик образцов болтовых соединений углеродных композитов с эпоксидной матрицей показывает, что предельное насыщение материала влагой и его термическое старение (плюс 80°С в течение 90

дней) способствует снижению статической прочности на 70% [178]. Исследование аналогичных образцов штифтовых соединений показало, что циклическая выдержка (120 циклов, один цикл включает 12 часов выдержки на воздухе при температуре плюс 50°C и 12 часов выдержки при температуре плюс 50°C при относительной влажности 98%) не оказывает существенного влияния на их многоцикловую прочность. В целом, насыщение композитного материала влагой, а также воздействие повышенных температур, оказывают отрицательное влияние на прочность механических соединений. Воздействие отрицательных температур имеет менее выраженный характер и, в большинстве случаев, приводит к повышению прочностных свойств композитов и соединений на их основе.

Негативные эффекты от гигротермального воздействия также свойственны клеевым соединениям, однако, в [82] отмечается, что они могут и не проявляться, т.к. в большей степени зависят от типа клеевой композиции и технологии подготовки склеиваемых поверхностей. Отмеченные выводы косвенно подтверждаются исследованиями клеевых соединений на основе эпоксидной клеевой композиции и эпоксидных углепластиков при предельном насыщении влагой и воздействии различных температур [179, 180]. В [179] показано снижение статической прочности на 42% (комнатная температура, 120 дней выдержки в водяной ванне). В исследовании [180] продемонстрирован положительный эффект 14% увеличения статической прочности (выдержка при температуре плюс 70°C в водяной ванне в течение 42 дней, испытание при температуре плюс 71°C).

В работе [181] для клеештифтовых соединений на основе эпоксидных углепластиков и эпоксидной клеевой композиции показано снижение статической прочности на 10%, а многоциклового – на ~15% (условия подготовки образцов и испытаний идентичны условиям для клеевых соединений, описанным выше). В то же время, снижение многоциклового прочности при тех же условиях для аналогичных клеевых соединений составило ~30%. Таким образом, клеемеханические соединения демонстрируют ориентировочно в два раза лучшую сопротивляемость гигротермальному воздействию, чем клеевые.

Проведенный обзор показал, что в условиях, близких к нормальным, когда нет длительного погружения композитов, армированных волокнами, в горячую воду, снижение прочности не является существенным и лежит в пределах межпартионных разбросов.

### **1.5 Формулировка цели и задач исследования.**

Проведенный обзор позволяет обосновать актуальность научного исследования, а также сформулировать основную цель и задачи исследования

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

Для достижения поставленной цели предлагается решить следующие **задачи исследования.**

1. Провести анализ напряженно-деформированного состояния каркасно-панельной конструкции с переменными зазорами между панелями и каркасом.

2. Развить инструментарий управления жесткостью клеевых соединений каркасно-панельного кузова.

3. Разработать методику комплексного трехмерного проектирования длинномерных композитных каркасно-панельных кузовов заданной долговечности с применением клеємеханических соединений переменной толщины с трансверсальными армирующими элементами – самонарезающими винтами.

4. Разработать численные модели для расчета напряженно-деформированного состояния и оценки прочности клеємеханических нахлесточных соединений типа «композит-сталь» с применением самонарезающих винтов при квазистатическом нагружении.

5. Разработать инженерную методику оценки многоциклового прочности клеевых нахлесточных соединений типа «композит-сталь» с применением самонарезающих винтов. Для оценки многоциклового прочности соединений использовать информацию о механическом поведении образцов при проведении лишь малоциклового испытаний.



## ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАРКАСНО-ПАНЕЛЬНОГО КУЗОВА С МАКРОГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ОТКЛОНЕНИЯМИ

В первой части главы представлено исследование влияния макрогеометрических отклонений каркаса на прочность длинномерных каркасно-панельных кузовов с клеиваемыми сэндвич-панелями на примере кузова низкопольного трамвайного вагона. Во второй части главы – методика комплексного трехмерного проектирования длинномерных каркасно-панельных кузовов заданной долговечности с применением клеемеханических соединений переменной толщины с трансверсальными армирующими элементами – самонарезающими винтами.

### 2.1 Анализ напряженно-деформированного состояния каркасно-панельной конструкции с переменными зазорами между панелями и каркасом.

Необходимость управления жесткостью соединений в каркасно-панельной конструкции с переменными зазорами между композитными панелями и каркасом показана на примере кузова трамвайного вагона, рисунок 13.

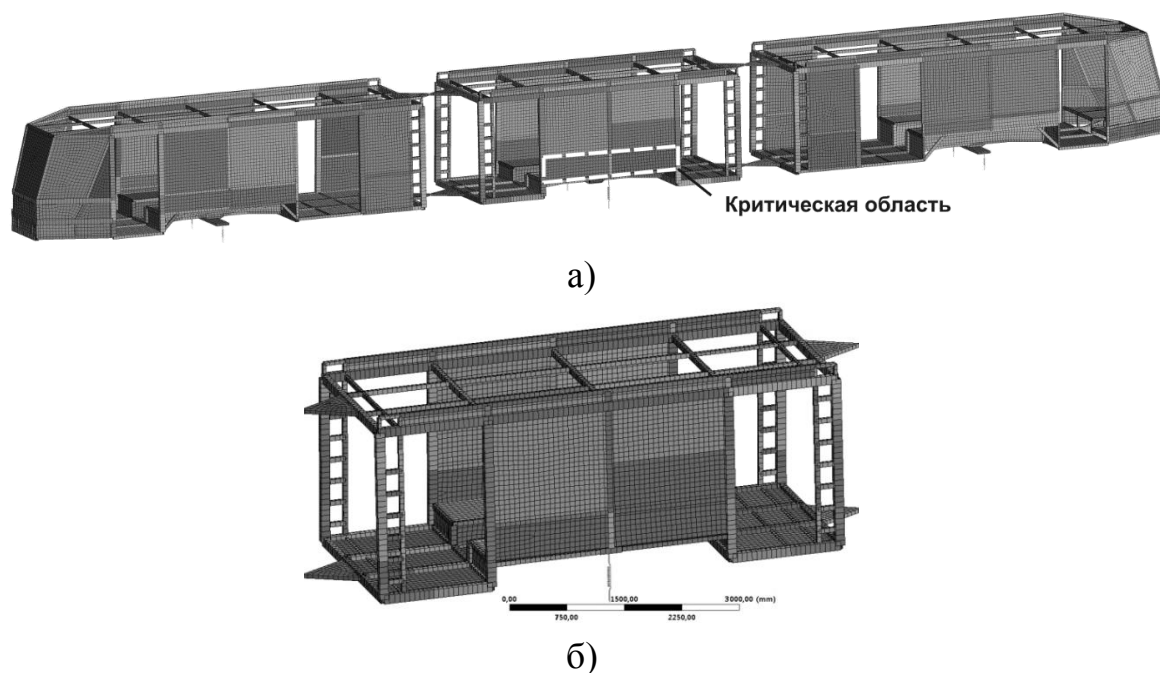


Рисунок 13 – МКЭ-модель каркасно-панельного кузова низкопольного трамвайного вагона (а) и его средней секции (б)

Вагон имеет следующие габаритные характеристики:

- общая длина вагона .....27300 мм;
- ширина вагона (по кузову) .....2480 мм;

Массовые характеристики трамвайного вагона:

- масса кузова вагона без учета массы тележек .....20500 кг;
- масса моторной поворотной тележки .....4500 кг;
- масса моторной неповоротной тележки .....4000 кг;
- общая масса вагона в сборе .....33500 кг.

Методом конечных элементов (МКЭ) в программном пакете ANSYS Workbench проведено расчетное исследование напряженно-деформированного состояния композитных сэндвич-панелей и стального каркаса боковин у дверного проема (критическая область, рисунок 13) с толщиной клея 1-6 мм (герметик полиуретановый TEROSTAT 8590 [182]). Типовая панель имеет размеры 500x1500 мм (рисунок 14).

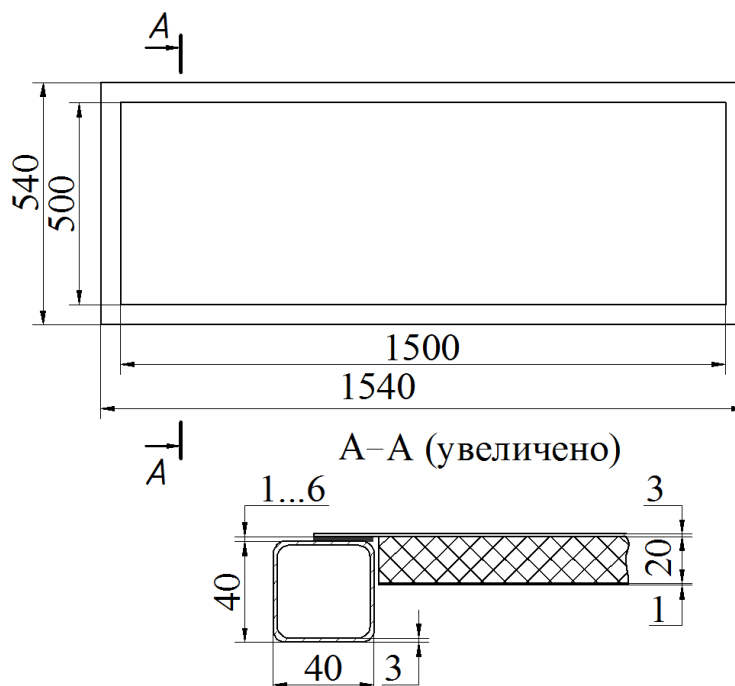


Рисунок 14 – Геометрия типовой панели в критической области кузова низкопольного трамвайного вагона

Обшивки панели – хаотически армированный стеклопластик толщиной 3 мм, наполнитель – пенопласт Divynicell P100 [183] толщиной 20 мм, каркас –

горячекатаная стальная труба по ГОСТ 8645-68 [67] (100x60x4 мм и 40x40x3 мм). Отмеченная вариация толщины клея определяется допусками на кривизну катаных труб заданной длины.

МКЭ-модель кузова имеет каркас из балочных конечных элементов (КЭ) и тонкостенную обшивку постоянной толщины  $t = 3$  мм из оболочечных КЭ, абсолютно жестко привязанную к каркасу и имеющую сдвиговую жесткость, эквивалентную натурным панелям. Модуль Юнга эквивалентной обшивки определен из условия равенства перемещений при сдвиге с детализированной МКЭ-моделью типовой панели, которая будет описана ниже.

Для реализации требуемой кинематической схемы сочленённого вагона (показана на рисунке 15) опорные площадки каждого из узлов сочленения секций вагона (площадки треугольной формы – вид сверху, рисунок 15) свободными вершинами связаны между собой по соответствующим степеням свободы.

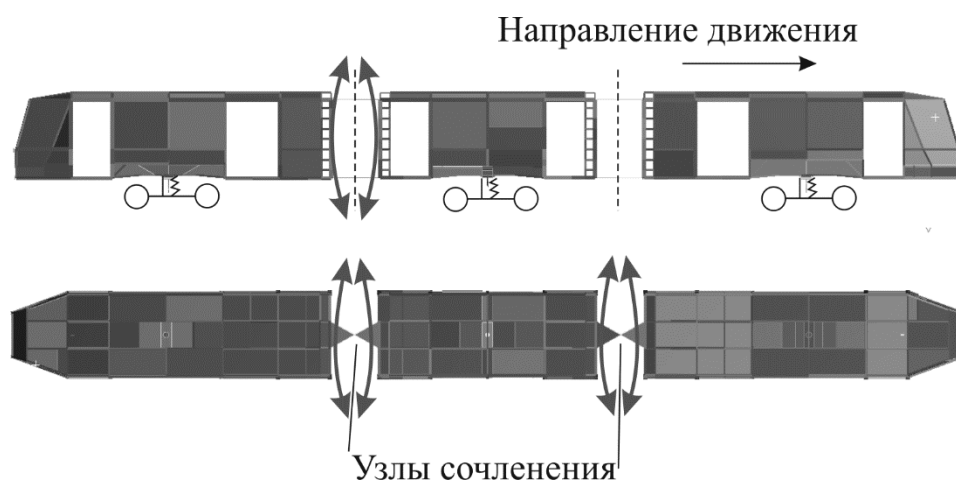


Рисунок 15 – Кинематическая схема трамвайного вагона

Был выполнен ряд расчетов с различными размерами КЭ (рисунки 16, 17).

Анализ сходимости показывает, что приемлемая точность расчетов (погрешность относительно решения с бесконечно мелкой сеткой не более 5%) достигается при характерном размере КЭ, равном 50 мм.

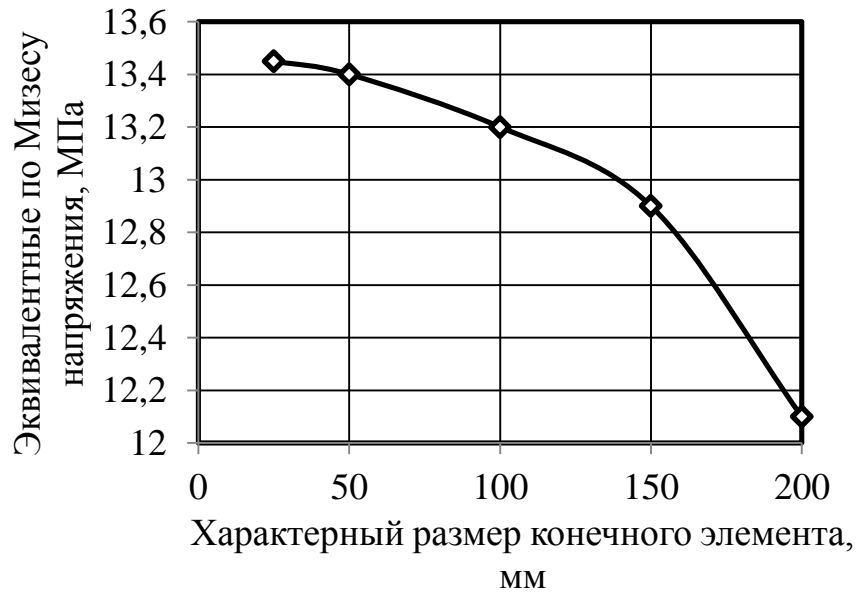


Рисунок 16 – Эквивалентные напряжения в критической области для панели МКЭ-модели кузова трамвайного вагона

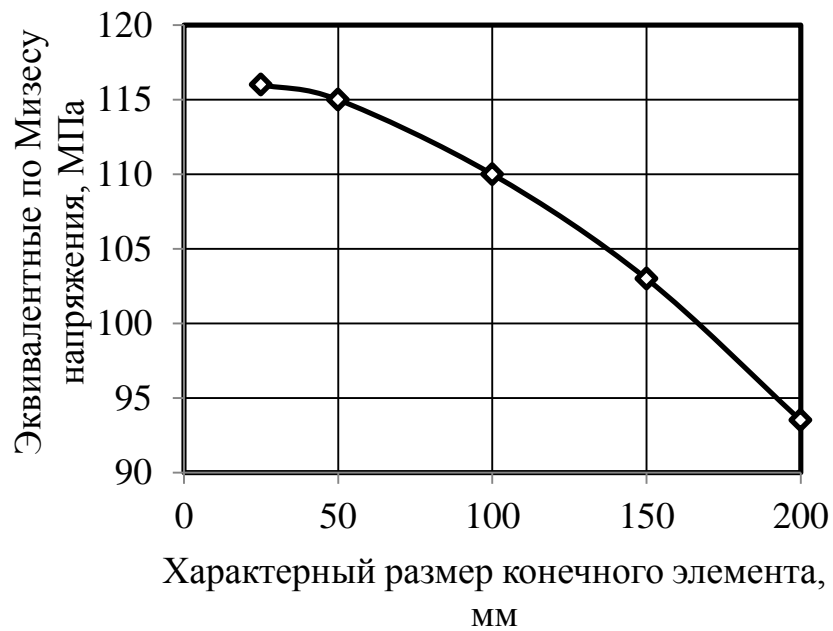


Рисунок 17 – Эквивалентные напряжения в критической области для каркаса МКЭ-модели кузова трамвайного вагона

Как было отмечено выше, тонкостенная обшивка МКЭ-модели кузова имеет сдвиговую жесткость, эквивалентную натурным панелям. Модуль Юнга эквивалентной обшивки определен из условия равенства перемещений при сдвиге с подробной МКЭ-моделью типовой панели (рисунок 18а). Зависимость модуля

Юнга эквивалентной обшивки от соотношения сторон типовой панели  $d$  при толщине клеевого шва 1 мм, показана на рисунке 18б. Размеры панели показаны на рисунке 14. Предварительные расчеты показали, что геометрические параметры труб каркаса несущественно влияют на эквивалентный модуль Юнга тонкостенной обшивки. В связи с этим, использовалась МКЭ модель типовой панели, вклеенной в каркас из стальных труб с размерами поперечного сечения 40x40x3 мм.

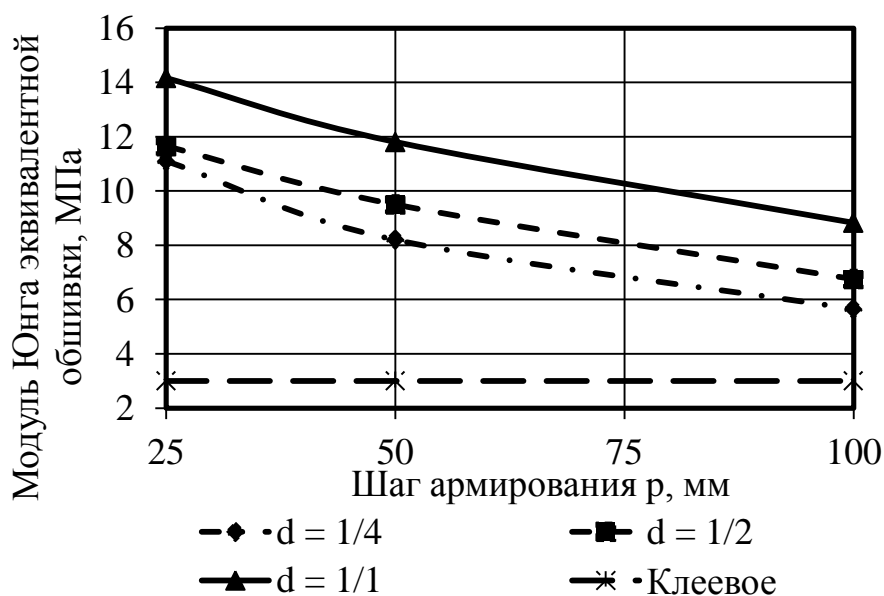
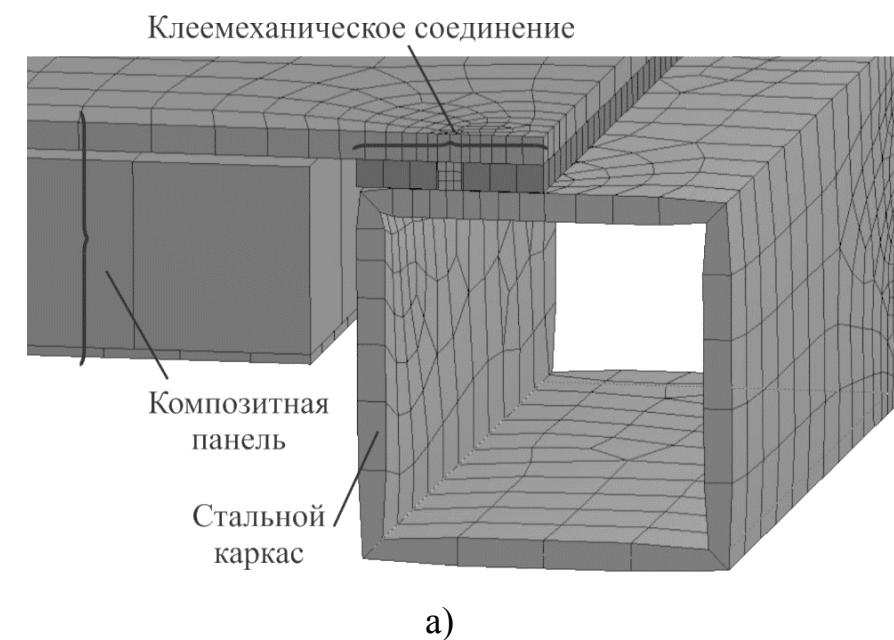
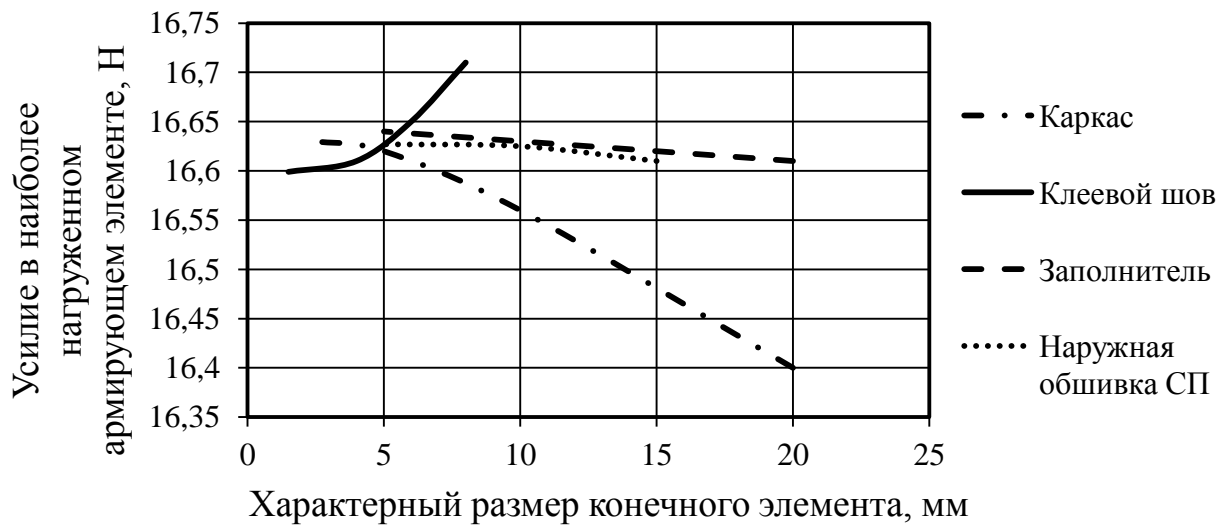


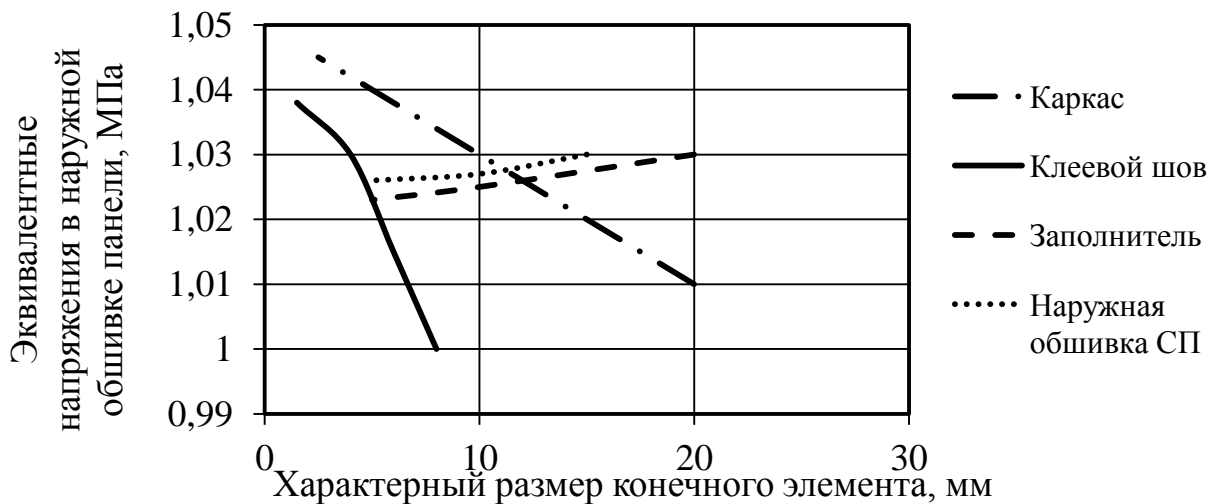
Рисунок 18 – МКЭ моделирование кузова трамвайного вагона:

а) МКЭ-модель типовой панели; б) модуль Юнга эквивалентной обшивки

В МКЭ-модели типовой панели использованы оболочечные КЭ для моделирования композитной обшивки и стального каркаса, объемные КЭ – для заполнителя, клеевого слоя, а также, в случае армирования – для цилиндрических элементов, эквивалентных по сдвиговой жесткости самонарезающим винтам. Сопряжение элементов панели друг с другом реализовано за счет стандартных контактных алгоритмов склейки, встроенных в программный пакет ANSYS. Для МКЭ-модели типовой панели был выполнен ряд расчетов с различными размерами КЭ (рисунок 19).



а)



б)

Рисунок 19 – Усилие в наиболее нагруженном армирующем элементе (а) и эквивалентные напряжения в центре наружной обшивки панели (б) в МКЭ-модели типовой панели

Анализ сходимости показывает, что приемлемая точность расчетов (погрешность относительно решения с бесконечно мелкой сеткой не более 5%) достигается при всех рассмотренных размерах КЭ. На графиках не показаны соответствующие зависимости для армирующих элементов: варьирование характерных размеров КЭ с 1 до 0,25 мм показало аналогичные результаты.

Для каркаса и наружной обшивки панели в зоне контакта с армирующими элементами назначался характерный размер КЭ, равный размеру КЭ армирующих элементов.

Таким образом, для дальнейших исследований был выбран следующий ряд характерных размеров конечных элементов:

- каркас: 10 мм;
- клеевой шов: 4 мм;
- наполнитель сэндвич-панели: 20 мм;
- обшивка сэндвич-панели: 15 мм;
- армирующий элемент: 0,75 мм.

В критической области также использована подробная МКЭ-модель типовой панели (рисунок 18а), совмещенная по своим границам с МКЭ-моделью кузова. При этом каркас МКЭ-модели типовой панели повторял соответствующий участок каркаса кузова вагона. Совмещение общей МКЭ-модели кузова и МКЭ-модели типовой панели в критической области показано на рисунке 20.

Совмещение реализовано за счет использования двух методов:

- метод слияния узлов конечно-элементной сетки для эквивалентной оболочечной обшивки кузова;
- встроенный в пакет ANSYS контактный алгоритм для сопряжения балочного и оболочечного каркасов МКЭ-моделей кузова и типовой панели, соответственно.

В расчете использованы изотропные модели линейного упругого деформирования материалов. Для хаотически армированного стеклопластика обшивок сэндвич-панелей использовано свойство псевдоизотропности.

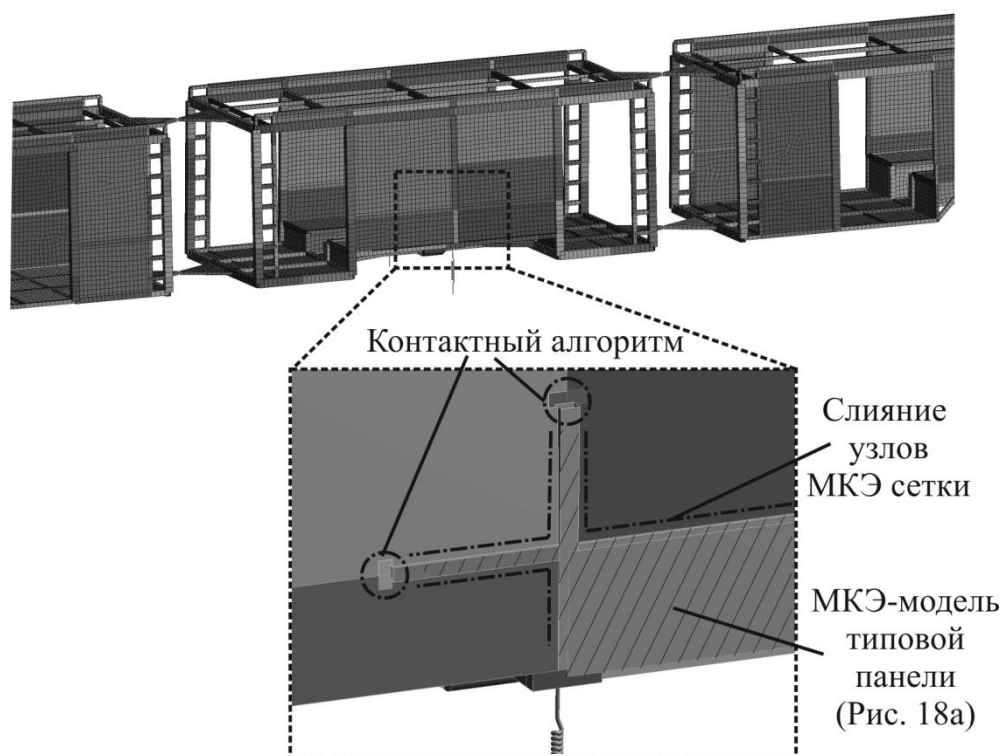


Рисунок 20 – Сопряжение МКЭ моделей кузова и типовой панели

Механические характеристики материалов показаны в таблице 3. Характеристики хаотически армированного стеклопластика (ХАСП) обшивок панелей получены по результатам испытаний (см. гл. 3).

Таблица 3 – Механические характеристики материалов, использованных в МКЭ-моделях кузова и типовой панели трамвайного вагона

Материал	Модуль упругости $E$ , ГПа	Коэффициент Пуассона $\mu$	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Сталь (профили каркаса)	200	0,3	7850
ХАСП (обшивки панелей)	13	0,23	2100
Пенопласт DivinyCell P100 (заполнитель панелей)	0,1	0,49	110
Полиуретановая композиция (клеевой шов)	4	0,49	1250
Эквивалентный материал армирующих элементов	От 4,5 до 45*	0,3	7850

\* в зависимости от толщины клеевого шва



Модуль упругости эквивалентного материала армирующих элементов получен из условия равенства жесткостей МКЭ-модели нахлесточного соединения и результатов испытаний аналогичных натуральных образцов (см. гл. 3). МКЭ-модель нахлесточного соединения повторяет структуру и конечно-элементную сетку соответствующего участка МКЭ-модели типовой панели (рисунок 21б). Схема нагружения МКЭ-модели показана на рисунке 21а.

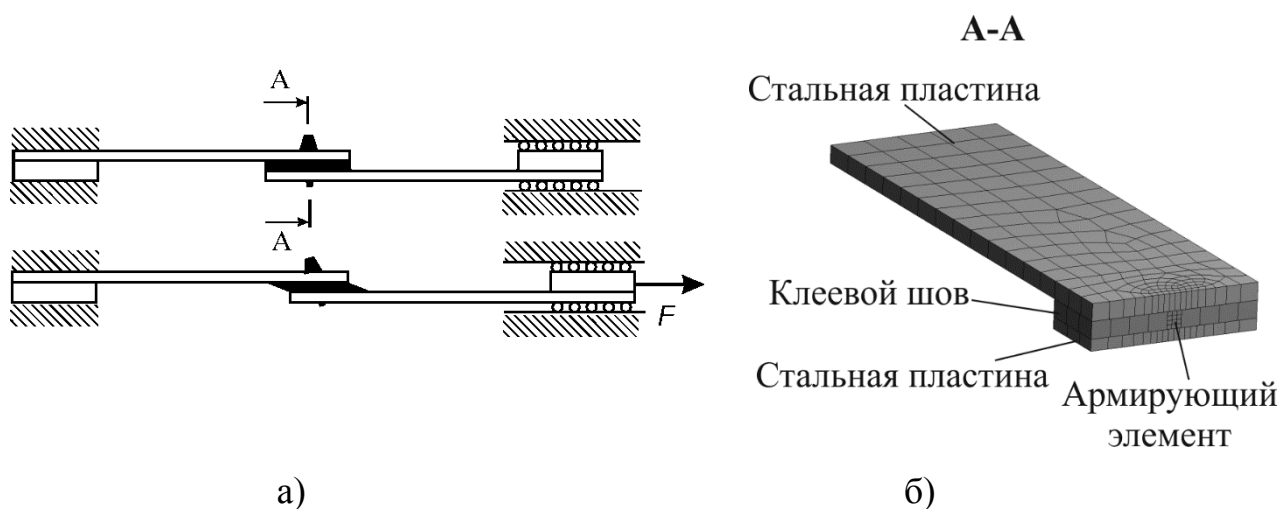


Рисунок 21 – Схема нагружения (а) и МКЭ-модель (б) нахлесточного клеемеханического соединения

Подробное описание МКЭ-моделей представлено в приложении А.

Расчет напряженно-деформированного состояния проведен для режима II, см. «Нормы для расчета и проектирования механической части новых вагонов трамвая колеи 1524 мм» [184] – разгон до конструкционной скорости/ торможение с конструкционной скорости на криволинейном участке пути. Схема нагружения показана на рисунке 22.

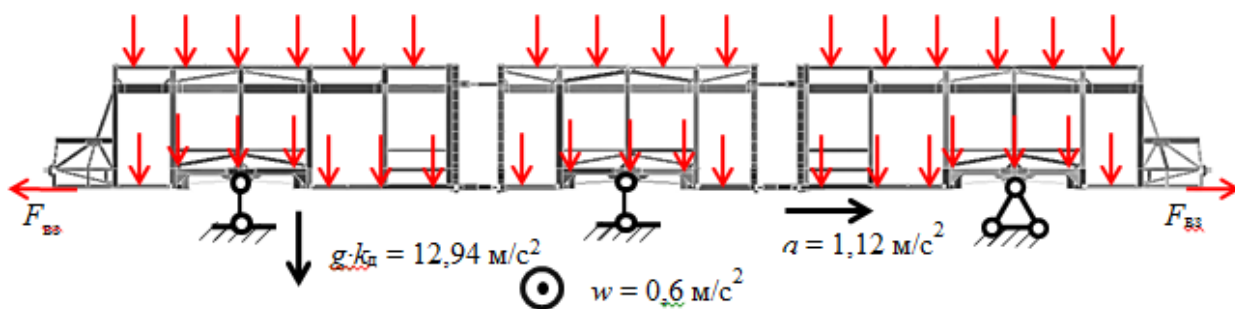


Рисунок 22 – Расчетная схема трамвайного вагона по режиму II [184]

В расчете учтено действие следующих нагрузок:

- собственный вес кузова вагона за вычетом оборудования, размещенного на крыше, равный 16850 кг;
- вес оборудования, размещенного на крыше равный 3650 кг;
- номинальная расчётная нагрузка от пассажиров (все места для сидения заняты пассажирами, плотность стоящих пассажиров 5 человек на 1м<sup>2</sup>) – 226 чел.;
- вертикальная динамическая нагрузка;
- боковые центробежные силы и продольные силы инерции;
- усилия растяжения или сжатия между вагонами, равные 50 кН.

Вес кузова вагона учитывается введением ускорения свободного падения, равного 9,81 м/с<sup>2</sup>. Масса оборудования считалась равномерно распределённой по продольным балкам крыши, предназначенным для установки оборудования. Вертикальное ускорение определено с учетом коэффициента вертикальной динамики  $k_d$ , вычисленного согласно [184].

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. Пример напряженного состояния каркаса кузова показан на рисунке 23.

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.

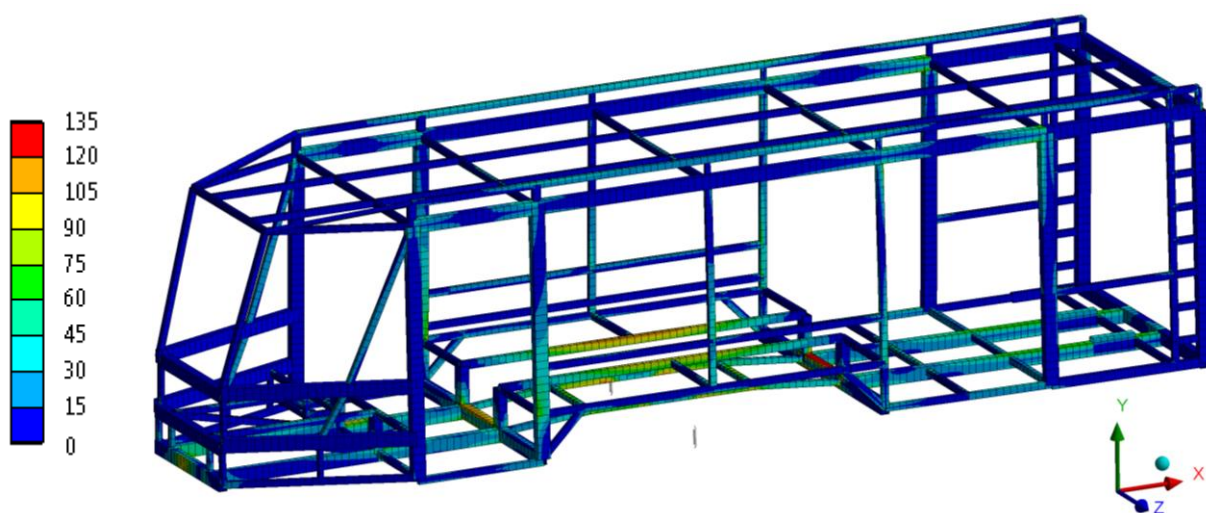


Рисунок 23 – Напряженное состояние каркаса кузова трамвайного вагона (нагрузки по режиму II «Норм...» [184]), МПа

Анализ величины максимальных эквивалентных напряжений в нагруженном элементе каркаса в зависимости от толщины клеевого слоя (критическая область на рисунке 13) показал, что перепад толщины клеевого шва величиной 5 мм для соседних панелей приводит к снижению напряжений в наружной обшивке панели на 65% и повышению напряжений в основных несущих трубах каркаса на 20% по сравнению с ситуацией, в которой те же швы имеют постоянную толщину (рисунки 24, 25).



Рисунок 24 – Максимальные эквивалентные по Мизесу напряжения в основных несущих трубах каркаса в зависимости от разницы толщины клеевого шва между соседними панелями

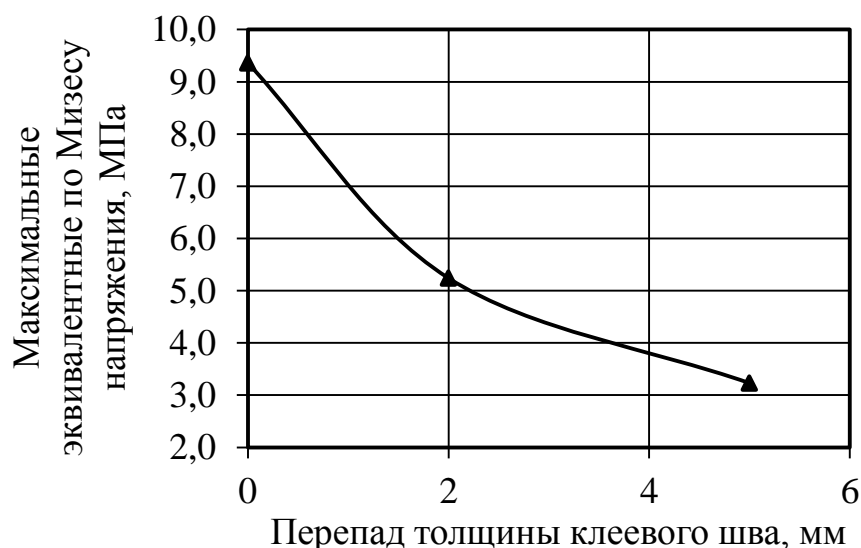


Рисунок 25 – Максимальные эквивалентные по Мизесу напряжения во внешней обшивке панелей в зависимости от разницы толщины клеевого шва между соседними панелями

Таким образом, переменные зазоры между панелями и каркасом оказывают существенный негативный эффект на несущую способность кузова за счет неравномерного распределения нагрузок в конструкции.

## 2.2 Способ управления жесткостью клеевых соединений каркасно-панельного кузова.

Высокие требования к долговечности конструкции кузова при его минимальном весе требуют выравнивания отмеченных в подразделе 2.1 нагрузок на композитные панели и каркас за счет регулирования жесткости клеевого шва переменной толщины. В данной работе предложена новая концепция управления жесткостью при помощи самонарезающих винтов малого диаметра.

В рассматриваемом примере использование в критической области (рисунок 13) клеомеханических соединений с шагом армирования  $p = 25-100$  мм приведет к 40% снижению максимальных напряжений в основных несущих трубах стального каркаса. С учетом степени в уравнении кривой усталости для элементов сварных конструкций из стального проката  $m = 4$  [184] отмеченное

снижение напряжений дает выигрыш в долговечности основных несущих элементов в  $\sim 7,5$  раз. 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 ниже номограмм, связывающих между собой толщину клеевого слоя ( $h$ , мм), шаг армирования самонарезающими винтами ( $p$ , мм) и погонную жесткость 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>;

$C_{sc}(h)$  – жесткость только механического соединения с одним самонарезающим винтом из испытаний, Н/мм (см. гл. 3);

$b$  – ширина нахлесточного клеемеханического соединения, мм;

$G$  – модуль сдвига клеевого шва, МПа.

Жесткость механического соединения с одним самонарезающим винтом описывается следующей аппроксимирующей зависимостью (см. подраздел 3.1):

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

Верификация предложенного выражения произведена путем сравнения сдвиговой жесткости двух МКЭ-моделей: типовой панели с клеемеханическими соединениями (рисунок 18а) и типовой панели той же геометрии, но имеющей клеевые соединения с эквивалентной сдвиговой жесткостью по формуле (1).

Схема нагружения МКЭ-моделей показана на рисунке 26. Значения пар сил  $F_1$ ,  $F_2$  обеспечивают действие момента величиной 1 КН·м в плоскости панели.

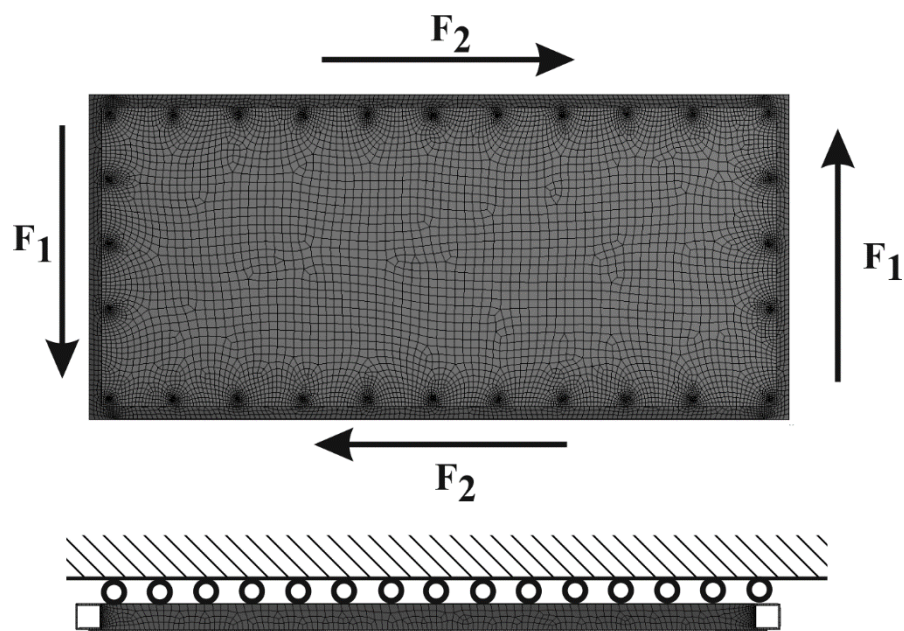
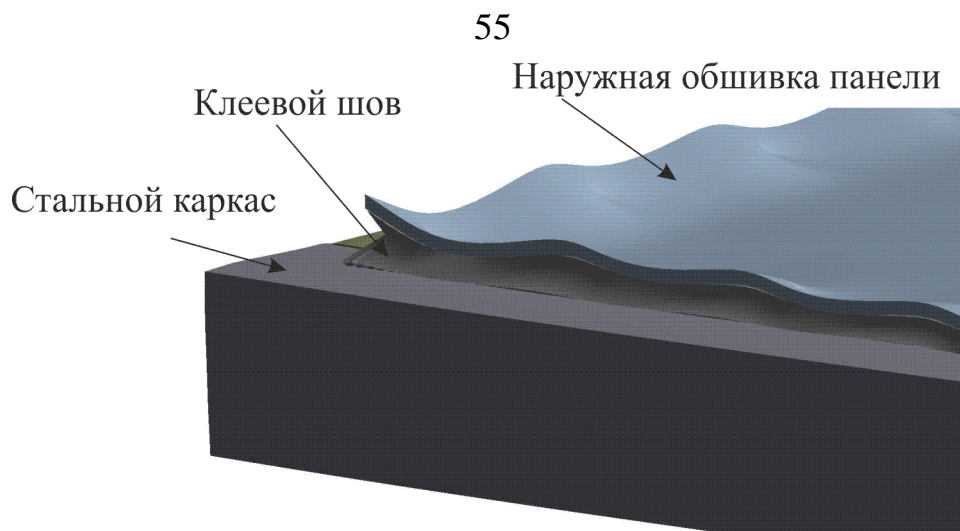
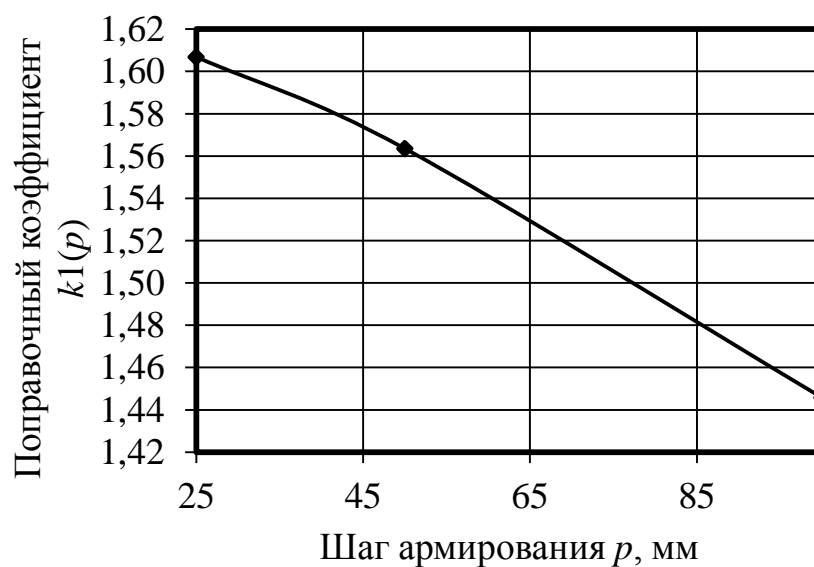


Рисунок 26 – Сдвиговое нагружение МКЭ-модели типовой панели

Анализ напряженно-деформированного состояния отмеченных МКЭ-моделей показал, что выражение (1) требует введения поправочного коэффициента  $k_1(p) = 1,45...1,60$ , необходимого для учета дополнительного локального деформирования (изгиб панели и винтов) в зоне соединений при сдвиге натурной конструкции (рисунок 27а).



(а)



б)

Рисунок 27 – Локальное деформирование (а) и связанный с ним поправочный коэффициент  $k_1(p)$  (б) для клеємеханических соединений между панелями и каркасом

Отмеченный изгиб приводит к значительному увеличению суммарной упругой энергии деформирования соединений. Расчетные исследования показали, что величина коэффициента  $k_1(p)$  меняется несущественно: менее 10% при увеличении шага армирования  $p$  от 25 мм до 100 мм. В связи с этим, для решения задач управления жесткостью им можно пренебречь.

Разработанные номограммы (рисунок 28) позволяют определять требуемый шаг армирования при заданной толщине клеевого слоя и жесткости соединения.

### 2.3 Методика проектирования каркасно-панельной конструкции

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

а) исходя из измеренных значений толщины клеевых швов натурной конструкции, производится процедура управления жесткостью, описанная в предыдущем разделе. В результате подбирается шаг армирования самонарезающими винтами  $p$ , обеспечивающий выравнивание жесткости клеевых соединений в наиболее нагруженных зонах конструкции.

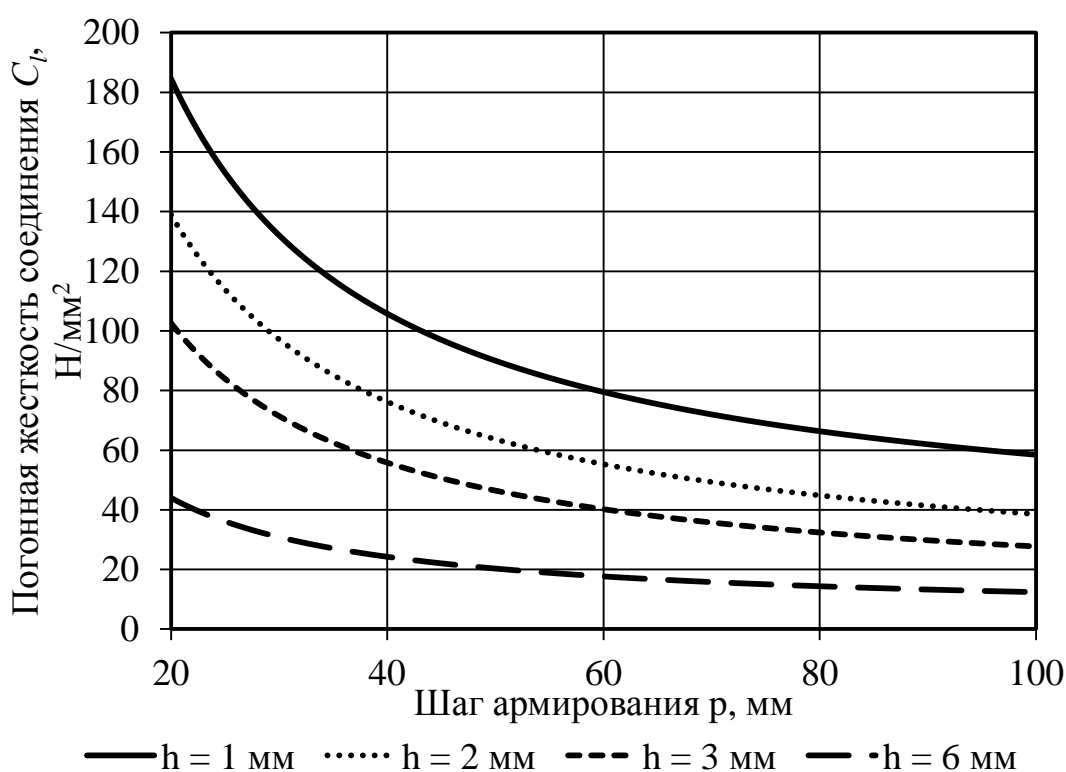


Рисунок 28 – Номограммы погонной жесткости клеємеханических соединений

б) производится расчет напряженно-деформированного состояния конструкции при помощи МКЭ-модели кузова с эквивалентной обшивкой по режимам I (аварийный) и II (эксплуатационный), см. «Нормы для расчета и проектирования механической части новых вагонов трамвая колеи 1524 мм» [184].



Расчетная схема для режима II рассмотрена в подразделе 2.1. Расчетная схема по режиму I показана на рисунке 29.

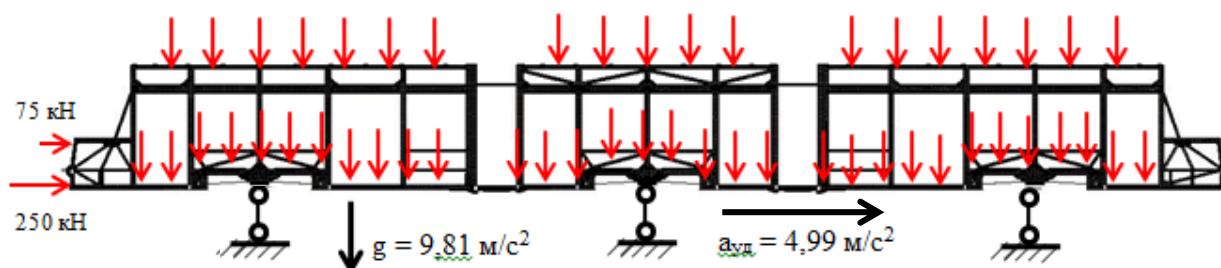


Рисунок 29 – Схема приложения нагрузок и закреплений кузова вагона для режима по режиму I (аварийному)

При расчете учитываются следующие нагрузки:

- собственный вес кузова вагона (20500 кг), включающий вес крышевого оборудования (3650 кг);
- максимальная расчётная нагрузка от пассажиров (все места для сидения заняты, плотность стоящих пассажиров 10 человек на 1 м<sup>2</sup> свободной площади пола, места для сидения нагружены силой давления от 40 человек), равная 31240 кг;
- продольная сила от удара при наезде на препятствие, составляющая 250 кН на лобовую балку, 75 кН на подоконный пояс кабины.

Продольная сила от удара приложена на площадках длиной 300 мм и уравновешена силами инерции вагона с пассажирами [184].

При расчете принято, что при наезде на препятствие вагон не осуществляет торможение с помощью устройств, располагаемых на тележках, поэтому сила сопротивления тележек в продольном направлении пренебрежимо мала и все силы инерции вагона воспринимают лобовая и подоконная балки. Такая схема соответствует наибольшим возможным нагрузкам на кузов при наезде на препятствие.

Силы веса кузова вагона учтены введением ускорения свободного падения, равного 9,81 м/с<sup>2</sup>.

в) по каждому режиму согласно заданному шагу армирования  $p$  (мм) вычисляются сдвиговые усилия в зоне центрального армирующего элемента на длинных сторонах панелей (рисунок 30). 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 в плоскости панелей (рисунок 31), построенные по соответствующим граням панелей эквивалентной обшивки МКЭ-модели кузова.

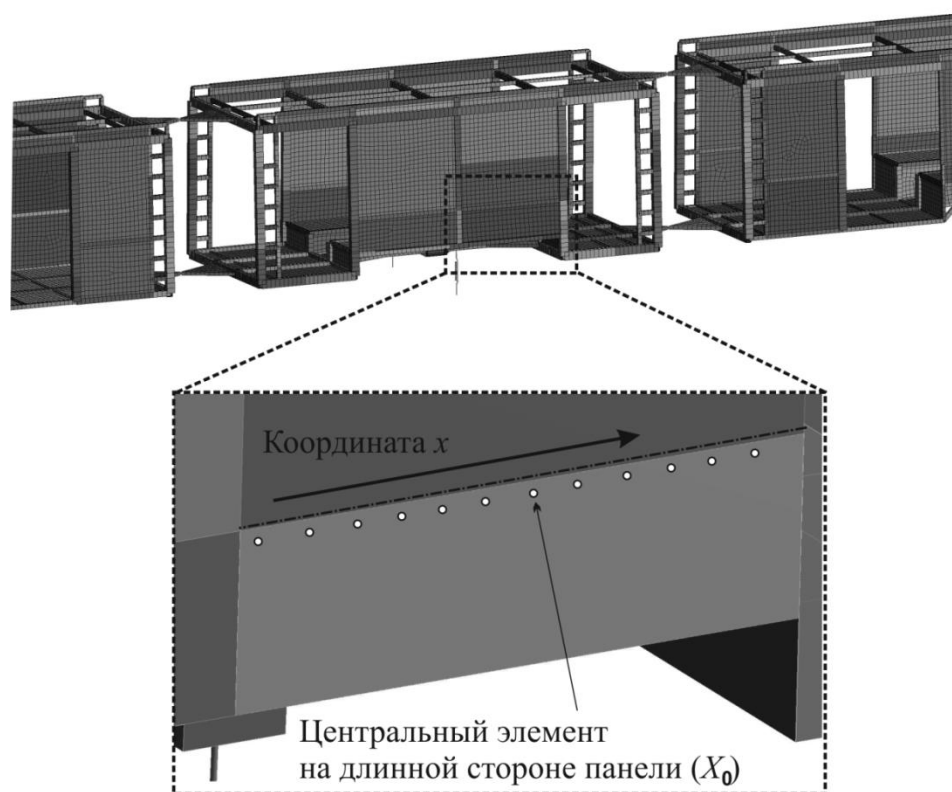


Рисунок 30 – Определение нагруженности клеемеханических соединений в составе каркасно-панельного кузова

Выражение для вычисления сдвиговых усилий выглядит следующим образом:

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

где  $t = 3$  (мм) – толщина эквивалентной по жесткости обшивки;

$\tau(x)$  – эпюра касательных напряжений (рисунок 31), построенная по координате  $x$ , МПа (рисунок 30);

$X_0$  – координата расположения центрального армирующего элемента, мм (рисунок 30).

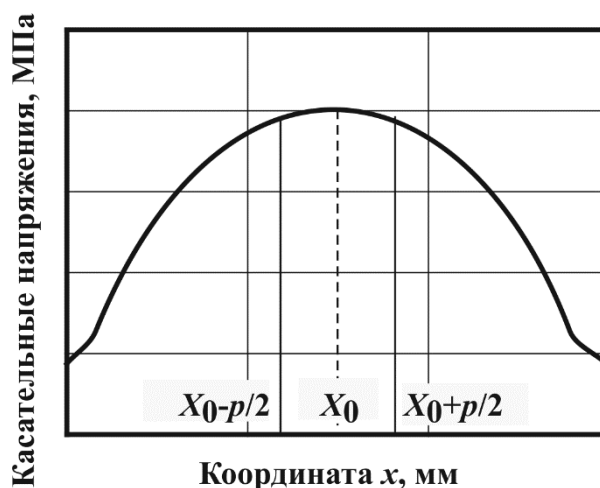


Рисунок 31 – Вид эпюры касательных напряжений, построенной по грани панели

г) вычисленная на предыдущем этапе сдвиговая нагрузка по каждому из режимов умножается на поправочные коэффициенты  $k_2(d)$  и  $k_3$ :

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

Коэффициент  $k_2(d)$  введен для учета концентрации напряжений, связанной с учетом особенностей работы клеемеханических соединений в натурной конструкции (рисунок 32).

Величина поправочного коэффициента  $k_2$  определена из анализа распределения усилий в МКЭ модели типовой панели (рисунок 18а), работающей на сдвиг (схема нагружения на рисунке 26). Она зависит от шага армирования, толщины клеевого шва и соотношения сторон  $d$ . Для упрощения методики проектирования, величина поправочного коэффициента оценена в запас для каждого из отношений сторон панели  $d$ .

Анализ показал, что при значениях  $d = 3..4$  жесткость каркаса резко возрастает, т.к. трубы, формирующие его короткую сторону, начинают работать не только на изгиб, но и на сдвиг за счет малого отношения длины к характерному размеру поперечного сечения. Это вызывает перераспределение нагрузок в натурной конструкции, отличающееся от того, что наблюдается в более простой МКЭ-модели кузова, в которой эквивалентная обшивка и каркас абсолютно жестко связаны между собой.

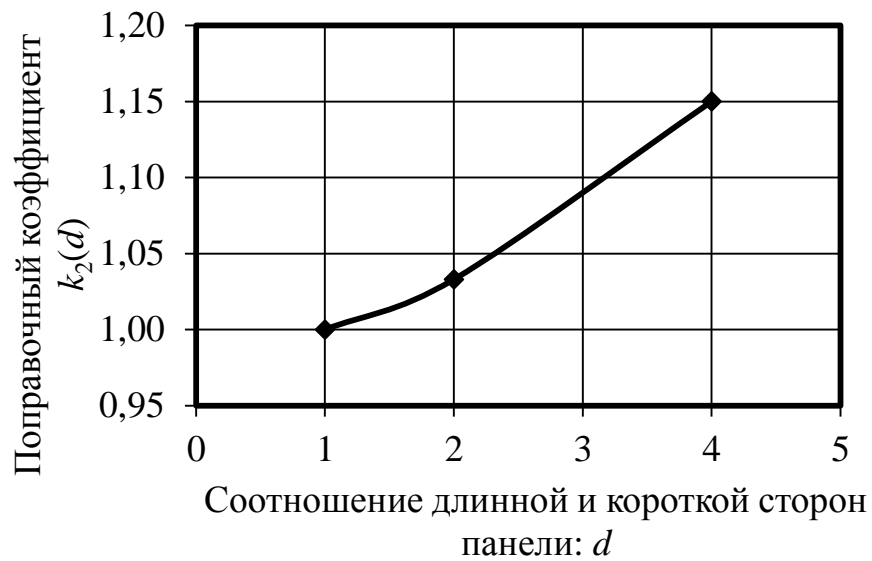


Рисунок 32 – Поправочный коэффициент по локальной нагрузке

Коэффициент  $k_3$  использован для учета гигротермальных эффектов при эксплуатации транспортного средства (снижение прочности). В рассмотренном случае ХАСП и самонарезающие винты имеют близкие по величине коэффициенты термического расширения, а также защищены от прямого воздействия атмосферных осадков и ультрафиолетового излучения защитным слоем – гелькоутом. Следовательно, воздействие влаги на соединение будет ограниченным и связано, в основном:

- с процессами конденсации влаги при значительном различии дневных и ночных температур (осенний и весенний сезоны);
- с замораживанием/размораживанием влаги при переходе через  $0^{\circ}\text{C}$ .

Проведенный обзор (п. 1.2.6) выявил отсутствие экспериментальных данных о гигротермальных эффектах для хаотически армированных стеклопластиков на основе полэфирных смол и эластичных клеевых композиций. Ввиду этого предлагается ориентироваться на ограниченный набор оценок, полученных для других материалов. Анализ имеющихся оценок показал, что максимальное снижение циклической и статической прочности клеевых и механических соединений композитов с полимерной матрицей при предельном насыщении влагой и воздействии повышенных температур достигает 60-70%. Клеемеханические соединения демонстрируют в два раза лучшую устойчивость к гигротермальному воздействию, чем клеевые. Таким образом, принимается допущение, что поправочный коэффициент  $k_3$  должен учитывать 30% снижение предельной нагрузки для клеемеханических соединений в процессе эксплуатации:

$$F \cdot (1 - 0,3) = F_0 \cdot k_2(d) \rightarrow k_3 = \frac{1}{1 - 0,3} = 1,42 \quad (5)$$

д) полученное с помощью выражения (4) сдвиговое усилие по режиму I подставляется в расчетную диаграмму деформирования соединения с одним винтом (гл. 3, рисунок 33). Проверяется статическая прочность соединения.

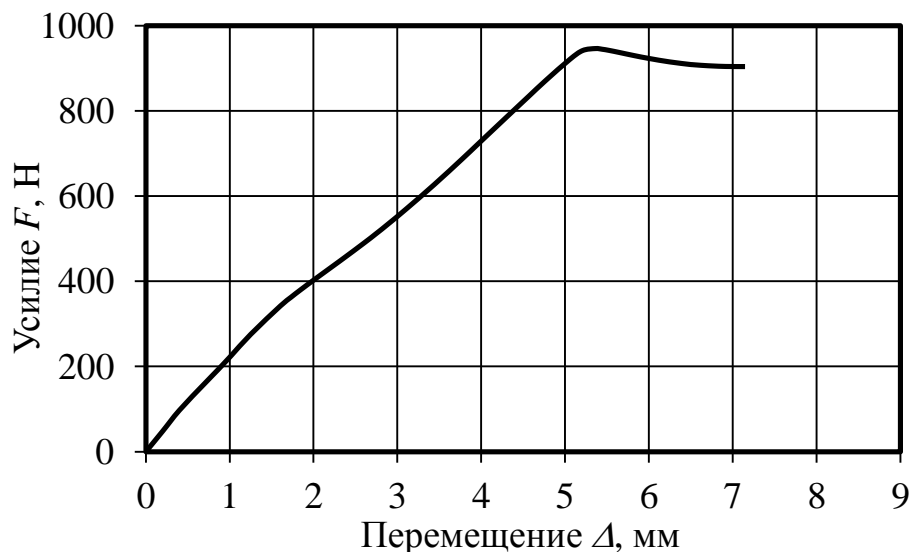


Рисунок 33 – Диаграмма статического деформирования клеемеханического соединения, армированного одним самонарезающим винтом.

Для расчета диаграммы используется разработанная автором МКЭ-модель соответствующего соединения, учитывающая нелинейность механического поведения материалов и концентрацию напряжений в области отверстий под винты.

е) полученное с помощью выражения (4) 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). Уравнение получено при помощи аппроксимации результатов испытаний образцов соединений в условиях малоциклового сдвигового нагружения (от  $1 \cdot 10^3$  до  $2 \cdot 10^4$  циклов) и имеет вид:

$$N(F) = \frac{15}{1,823 \cdot 10^{-15} \cdot F^{5,312}}, \quad (6)$$

где  $N$  – количество циклов до наступления предельного состояния;

$F$  – амплитуда циклической сдвиговой нагрузки, Н.

ж) при выбранных параметрах типовой панели и полученных значениях статической, циклической прочности соединений, величина приведенных напряжений в композитных обшивках и заполнителе гарантированно не будет превышать предела пропорциональности. Кроме того, назначенная толщина заполнителя обеспечивает необходимый запас устойчивости панели относительно критических для соединений сдвиговых нагрузок. В связи с этим оценка прочности и устойчивости панели в критических зонах может не проводиться. Такая ситуация обусловлена следующими факторами:

- панели выполняют роль функциональных элементов, обеспечивающих не только сдвиговую прочность конструкции кузова, но и его тепло- и шумоизоляцию;

- панели выполняют роль несущих элементов при трансверсальном локальном нагружении обшивки кузова (низкоскоростной удар) и должны выдерживать значительные нагрузки.

Данные факторы приводят к значениям толщин обшивок и заполнителя, обеспечивающим избыточную сдвиговую прочность и устойчивость панели.

з) производится оценка прочности стального каркаса согласно отмеченным «Нормам...» [184].

е) в случае невыполнения того или иного критерия прочности, цикл проектирования повторяется при измененном шаге армирования  $\rho$ . Практика расчетов показала, что достаточно 2-3 итераций для получения решения, удовлетворяющего критериям прочности.

#### 2.4 Расчетно-экспериментальное исследование элементов конструкции каркасно-панельного кузова с применением МКЭ и масштабных макетов

Для изучения механического поведения каркасно-панельной конструкции (КПК), а также верификации ее расчетных МКЭ-моделей разработаны масштабные макеты, общий эскиз которых изображен на рисунке 34.

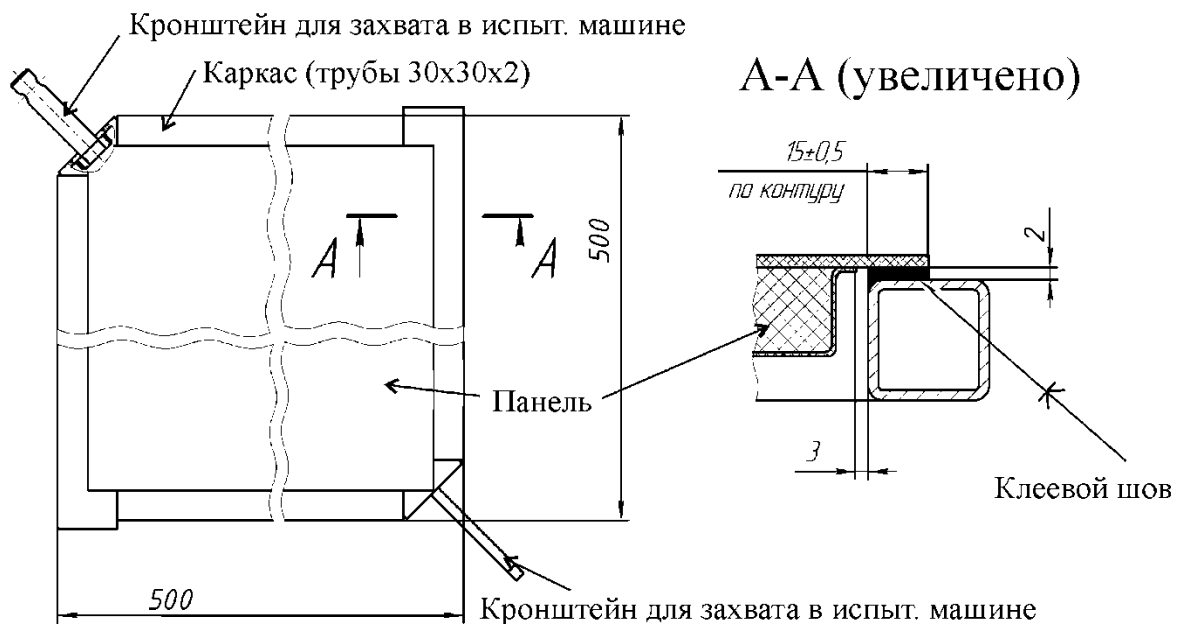


Рисунок 34 – Эскиз масштабного макета КПК

Макет имеет три исполнения:

- только стальной каркас (3 шт.);
- каркас вместе с клеенной панелью, имеющей пенопластовый наполнитель Divinycell P100 [183] толщиной 20 мм, а также наружную и внутреннюю обшивки из ХАСП толщиной 2 мм и 1 мм соответственно (2 шт.).
- каркас вместе с панелью, аналогичной предыдущему исполнению, которая прикреплена при помощи клеемеханических соединений, армированных самонарезающими винтами с шагом  $p = 50$  мм (2 шт.).

Обшивки панели из ХАСП изготовлены методом контактного формования на основе стекломата плотностью  $300 \text{ г/м}^2$  и полиэфирной смолы марки Agorol S19 TA с катализатором Butanox M-50 [185]. Отверждение заготовок обшивок и панели в целом проведено при комнатной температуре в течение 24 часов с последующим постотверждением в сушильном шкафу в течение 4 часов при температуре  $70^\circ\text{C}$ . Изготовление панели проведено в два этапа. На первом этапе, после отверждения, наружная обшивка приклеена к наполнителю с помощью клеевой пасты Enguard 72A. Затем непосредственно на наполнителе отформована внутренняя обшивка и проведено отверждение и постотверждение панели в целом согласно режиму, описанному выше.

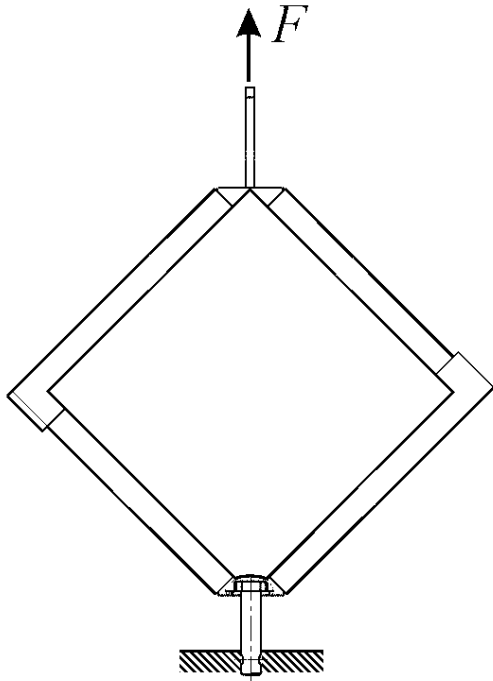
В качестве материала клеевого шва толщиной 2 мм использован полиуретановый герметик Terostat 8590. Процесс склейки, включая подготовку поверхностей, нанесение клеевой композиции и последующее отверждение, проведен согласно рекомендациям производителя [182]. Армирование клеевых соединений макетов соответствующего исполнения выполнено при помощи самонарезающих винтов по DIN 7962 [162] с цинковым покрытием.

Перед монтажом самонарезающих винтов были просверлены технологические отверстия диаметром 2 мм (по внутреннему диаметру резьбы). Сверление проведено при помощи высокопрочного сверла с алмазным напылением для металлических изделий со скоростью вращения 3000 об/мин и подачей 0,01 мм/об. Произведена также зенковка отверстий под самонарезающие



винты со стороны стеклопластиковой пластины сверлом диаметром 4 мм с углом заточки  $120^\circ$  на глубину 1,5 мм.

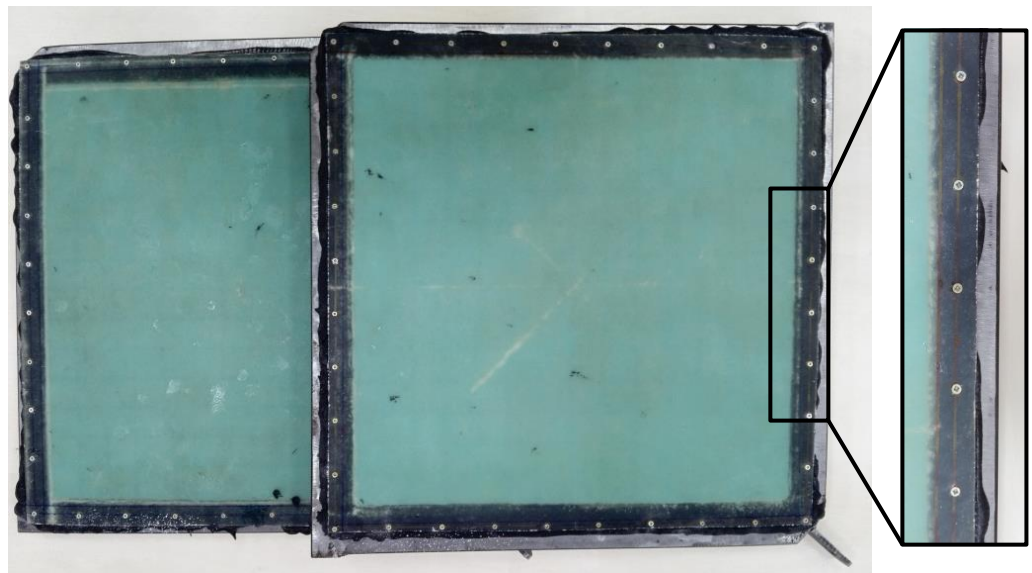
Схема сдвигового нагружения макета показана на рисунке 35а. Величина максимальной нагрузки составляла  $F = 2000$  Н.



а)



б)



в)

Рисунок 35 – Схема нагружения (а) и фотографии (б), (в) масштабных макетов КПК с вклеенными панелями

Испытания на квазистатическое растяжение макетов по указанной выше схеме проведены на универсальной испытательной машине INSTRON 5882. Скорость движения траверсы составила 1 мм/мин, температура окружающей среды  $23\pm 1^\circ\text{C}$ . Для каждого макета испытания проводились 3 раза, затем результат (перемещение подвижной траверсы испытательной машины при максимальной нагрузке) усреднялся и записывался в протокол испытаний. Диаграммы испытаний показаны в приложении Б.1.

МКЭ-модели макетов (рисунки 38, 37) в части конечно-элементной сетки, моделей и параметров материалов, а также методов сопряжения частей макета повторяет МКЭ-модель типовой панели (см. подраздел 2.2). Модуль упругости эквивалентного материала самонарезающих винтов для величины зазора 2 мм принят равным  $E = 4,5$  ГПа.

МКЭ-модели макетов показаны на рисунках 38, 37.

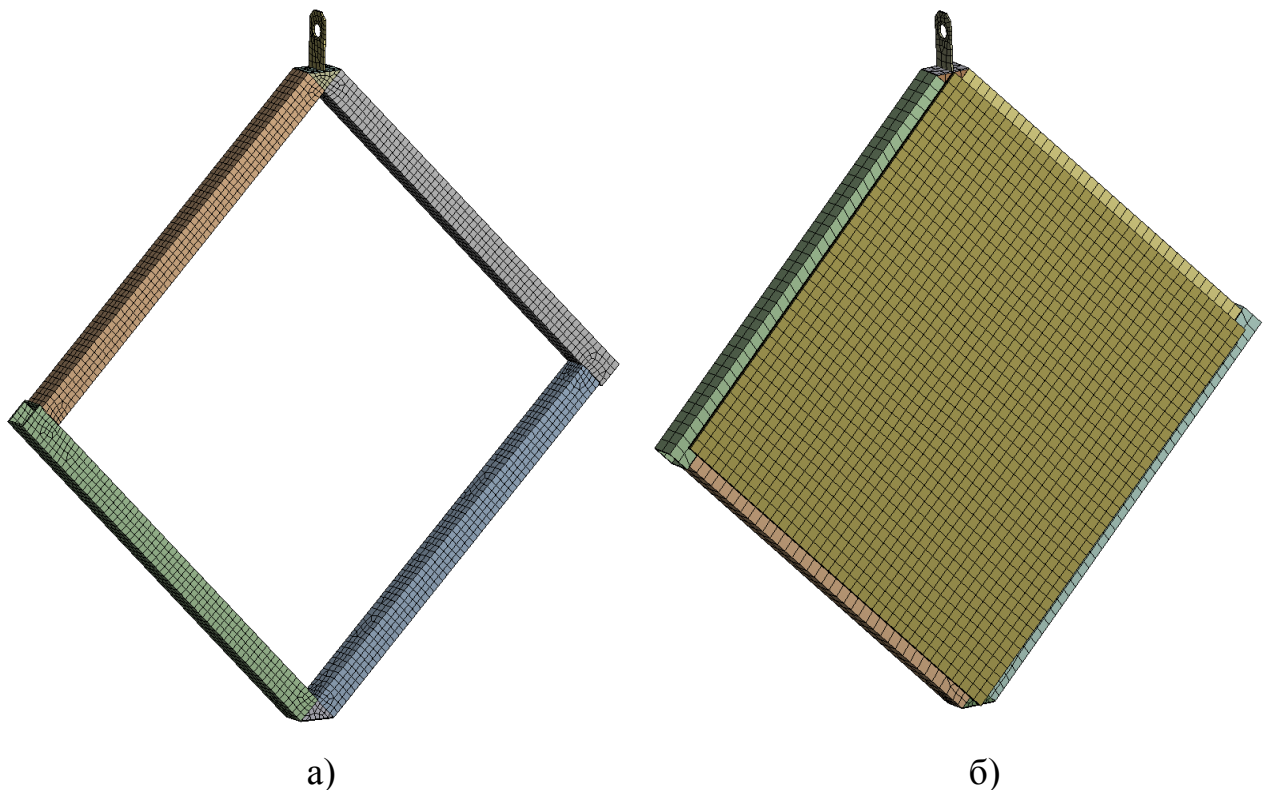


Рисунок 36 – МКЭ-модель масштабного макета КПК без панели (а) и с вклеенной панелью (б)

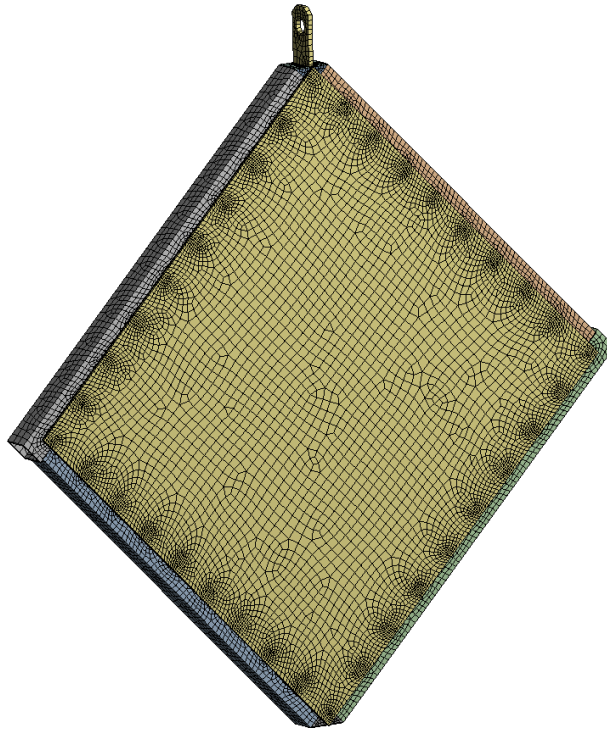


Рисунок 37 – МКЭ-модель масштабного макета КПК с клеємеханическими соединениями

К МКЭ-моделям масштабных макетов КПК приложены те же граничные условия, что и в реальных испытаниях. Расчетное поле перемещений макетов КПК показаны на рисунках 38, 39.

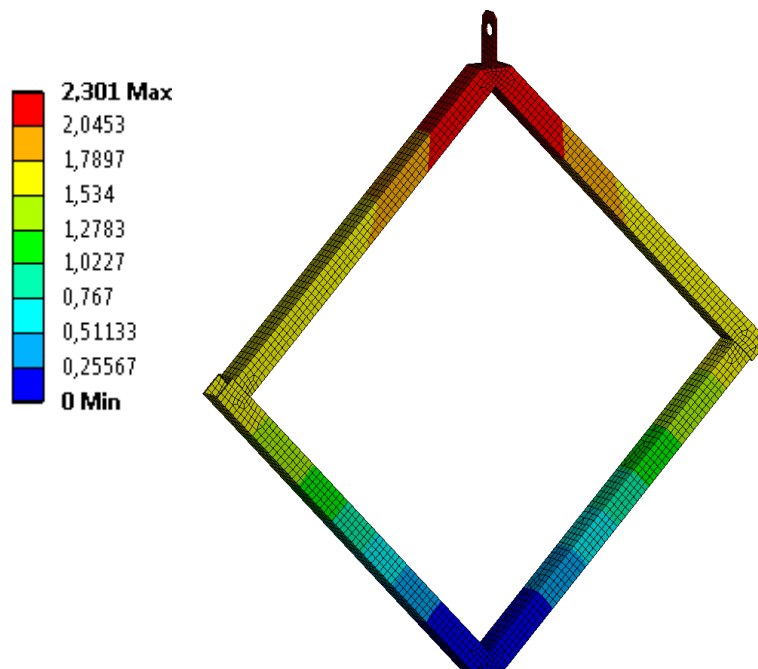
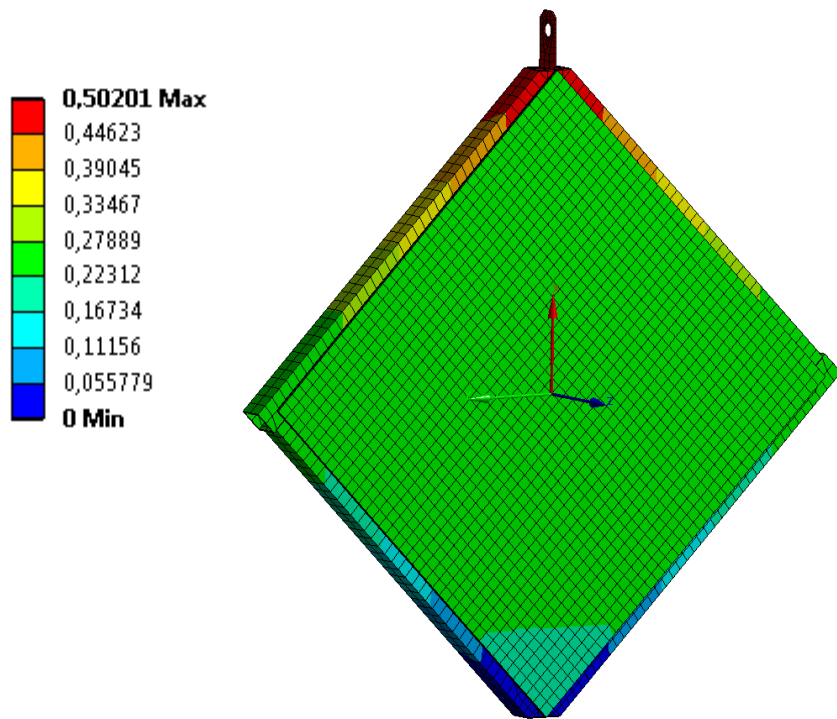
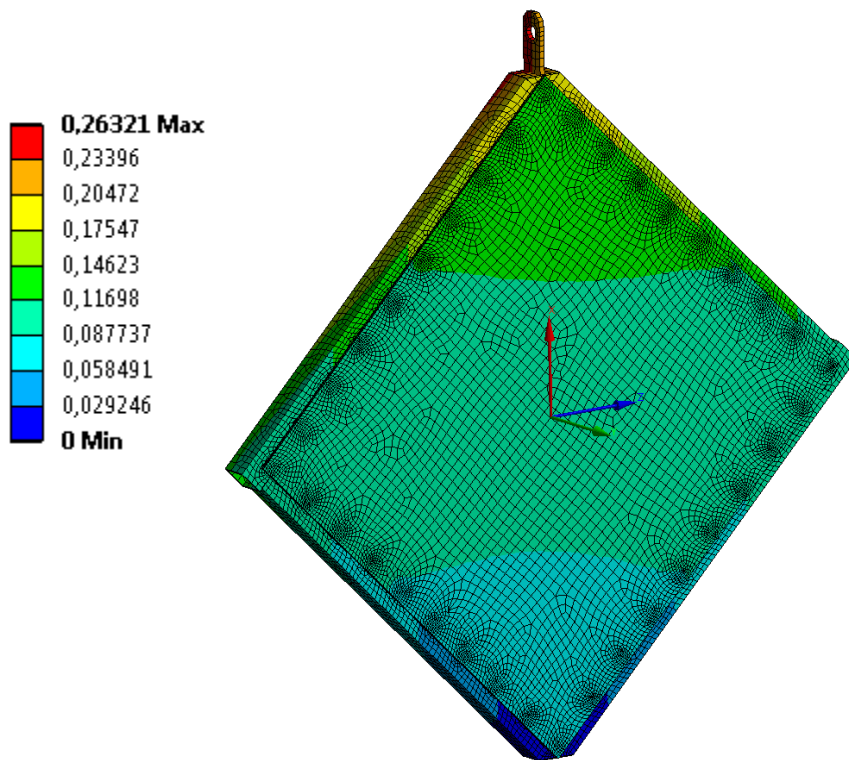


Рисунок 38 – Поле вертикальных перемещений МКЭ-модели масштабного макета КПК без панели



a)



б)

Рисунок 39 – Поле вертикальных перемещений МКЭ-моделей масштабных макетов КПК с вклеенной панелью (а) и панелью с клеємеханическими соединениями (б)

Результаты статистической обработки натуральных испытаний макетов и сравнение с результатами МКЭ-моделирования показаны в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты исследований макетов КПК

Тип макета		Нагрузка (Н)	Максимальное перемещение			Отличие от результатов испытаний (%)
			Среднее (мм)	СКО (мм)	Коэффициент вариации (%)	
Без сэндвич-панели	Натурный	2000	2,13*	0,04	1,8	
	МКЭ-модель		2,28**	–	–	7
Вместе с сэндвич-панелью	Натурный	2000	0,52*	–	–	–
	МКЭ-модель		0,57**	–	–	10
Вместе с самонарезающими винтами	Натурный	2000	0,28*	–	–	–
	МКЭ-модель		0,25**	–	–	10

\* за вычетом вклада в перемещения от испытательной оснастки 0,15 мм, выявленных в результате отдельных испытаний оснастки

\*\* перемещения отверстия для штифта крепления к траверсе испытательной машины

Как видно из таблицы, МКЭ-модель типовой панели дает удовлетворительное совпадение перемещений с результатами испытаний натурной конструкции.

Следует отметить, что исследование проводилось при квазистатическом нагружении в пределах нагрузок, не приводящих к разрушению клеемеханических соединений. Как видно из таблицы 4, вклеивание панели приводит к увеличению сдвиговой жесткости каркаса КПК в ~4 раза, тогда как использование панели с усилением при помощи самонарезающих винтов – в 7,6 раза, что говорит об эффективности выбранного способа разгрузки каркасных элементов кузова транспортных средств.

## 2.5 Выводы по главе

В главе предложена новая методика проектирования кузова каркасно-панельного транспортного средства, имеющего в составе композитные сэндвич-

панели и клеемеханические соединения переменной толщины. Развит инструментарий комбинирования численно эффективной упрощенной (эквивалентной по жесткости балочно-оболочечной) конечно-элементной модели кузова и детализированного участка с трехмерными моделями конструктивных элементов с заданной нагруженностью.

На примере каркасно-панельного кузова низкопольного трамвайного вагона показано, что использование в наиболее нагруженной области клеемеханических соединений переменной толщины (1-6мм) с шагом армирования (25-100 мм) приведет к выравниванию их жесткости и к 40% снижению максимальных напряжений в основных несущих профилях стального каркаса по сравнению с вариантом без армирования. С учетом степени в уравнении кривой усталости для элементов сварных конструкций из стального проката  $m = 4$  [184] отмеченное снижение напряжений дает выигрыш в долговечности основных несущих элементов в  $\sim 7,5$  раз. При этом дополнительный эффект разгрузки будет достигнут не только за счет выравнивания, но и за счет значительного возрастания жесткости соединений каркаса и панелей.

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. Разработаны номограммы погонной жесткости соединений для шага армирования в диапазоне 25-100 мм и толщины клеевого слоя 1-6 мм.

Созданная методика отработана на примере кузова трамвайного вагона. После подбора необходимого шага армирования при помощи отмеченных номограмм в рамках методики производится оценка нагруженности армированных соединений и каркаса. Нагрузки определяются с помощью упрощенной МКЭ-модели кузова и поправочных коэффициентов, вычисленных на основе подробного верифицированного экспериментом МКЭ-моделирования типовых каркасно-панельных конструкций. Проверка статической прочности и

долговечности соединений реализована, соответственно, на основе верифицированных МКЭ-моделей армированных соединений (гл. 3) и аналитических экспериментальных зависимостей (гл. 4).

### ГЛАВА 3. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КЛЕЕМЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ С КОМПОЗИТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ, ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ДО РАЗРУШЕНИЯ

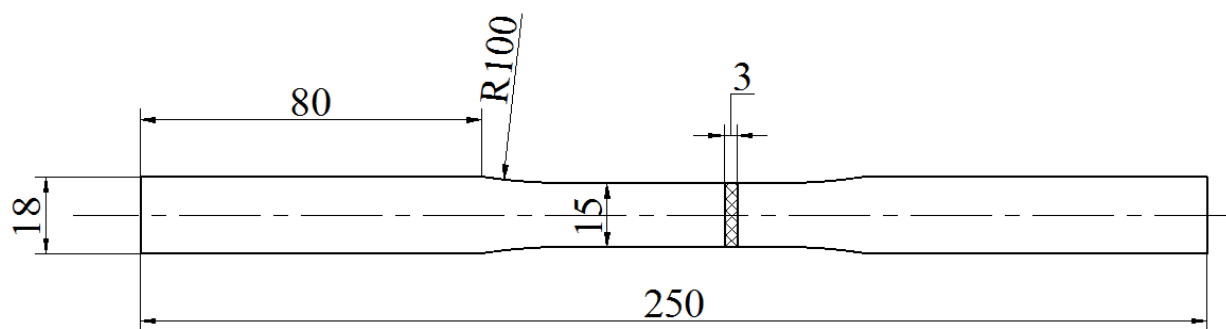
В данной главе представлены результаты расчетно-экспериментального анализа механического поведения клеемеханических соединений, необходимого для подтверждения эффективности использования самонарезающих винтов в качестве армирующих элементов, а также для разработки соответствующего расчетного инструментария методики проектирования каркасно-панельного кузова с макрогеометрическими отклонениями (пункт (д), подраздел 2.3).

#### **3.1 Экспериментальное исследование механических характеристик элементов нахлесточных соединений**

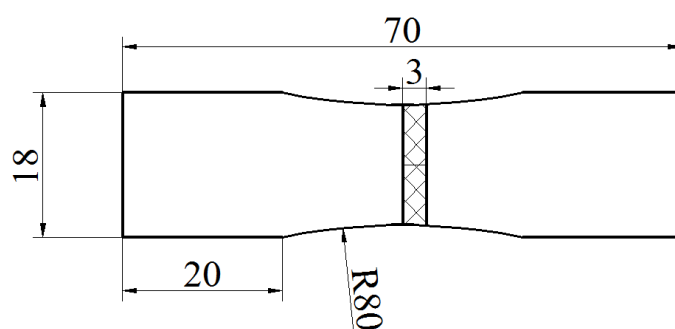
##### **3.1.1 Испытания образцов из ХАСП**

В качестве обшивки панелей каркасно-панельного кузова предлагается использовать недорогой хаотически армированный стеклопластик (ХАСП), механические характеристики которого мало изучены и зависят от свойств стеклянных волокон и их массовой доли в материале [18]. На соотношение массовых долей волокон и матрицы в композитном материале значительное влияние оказывает технология изготовления. В данной работе предлагается использовать метод контактного формования, являющийся наиболее рентабельным в условиях мелкосерийного производства для относительно изделий простой формы. В литературе не удалось найти корректных данных о характеристиках ХАСП, изготовленного методом контактного формования. В связи с этим, были проведены соответствующие испытания образцов ХАСП на растяжение по ГОСТ 25.601-80 [186], сжатие по ГОСТ 25.602-80 [187], а также смятие отверстий (локальная прочность). При этом использованы образцы (см. рисунок 40) с произвольным направлением вырезки, т.к. ХАСП обладает свойством псевдоизотропности в плоскости армирования стеклянными волокнами.

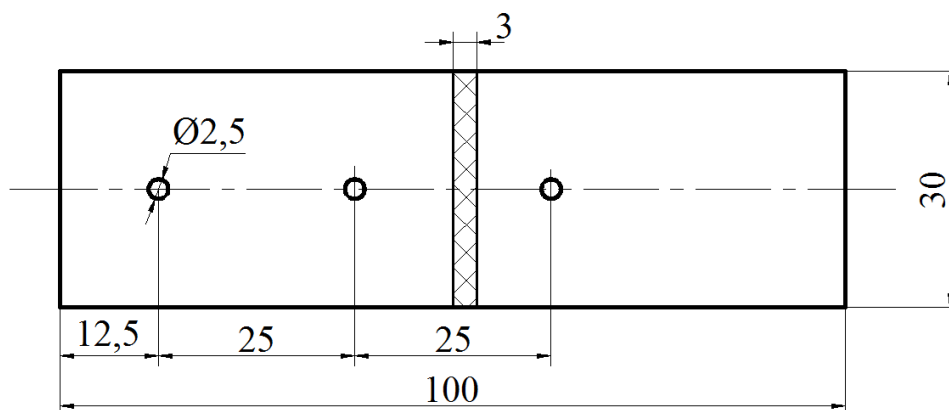




а)



б)



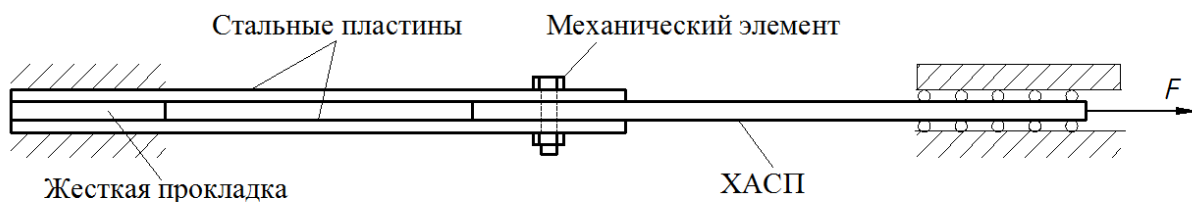
в)

Рисунок 40 – Эскизы образцов ХАСП для квазистатических испытаний на растяжение (а), сжатие (б), смятие отверстий (локальная прочность) (в)

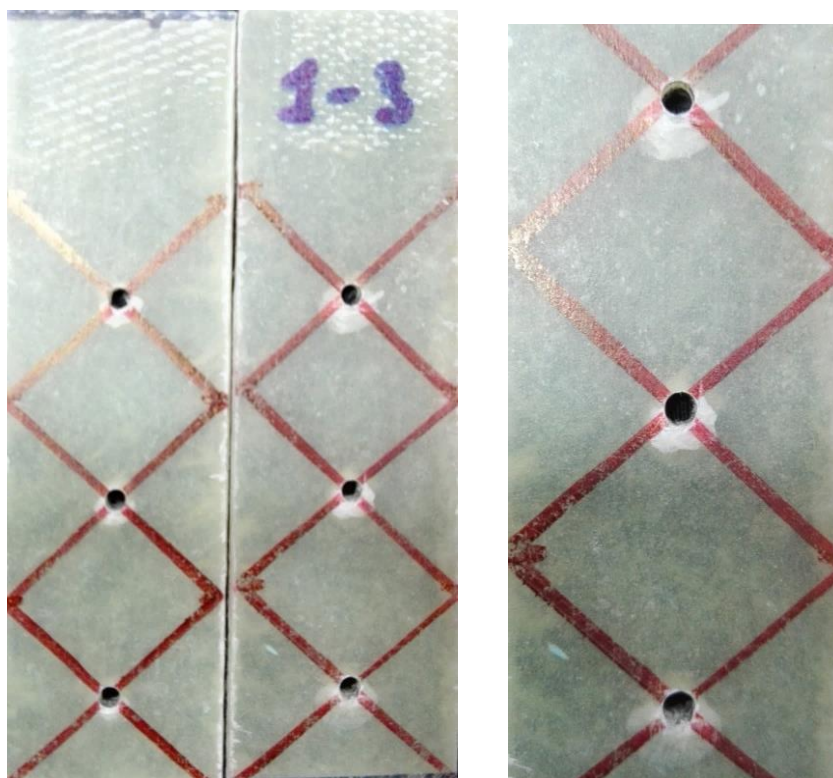
Пластины из ХАСП толщиной 3 мм изготовлены методом контактного формования на основе стекломата плотностью 300 г/м<sup>2</sup> и полиэфирной смолы марки Agopol S19 TA с катализатором Butanox M-50 [185]. Отверждение заготовок стеклопластиковых пластин проведено при комнатной температуре в течение

24 часов с последующим постотверждением в сушильном шкафу в течение 4 часов при температуре 70°C.

Отверстия в соответствующих образцах изготовлены при помощи сверла с алмазным напылением для металлических изделий. Скорость вращения сверла составляла 3000 об/мин, скорость подачи: 0,01 мм/об. Диаметр отверстий составлял 2,5 мм. Для снижения начальных повреждений при выходе сверла из отверстий [77] сверление проводили на бруске из древесины. Схема испытания образцов ХАСП на смятие отверстий представлена на рисунке 41а. Механический элемент имел диаметр 2,5 мм.



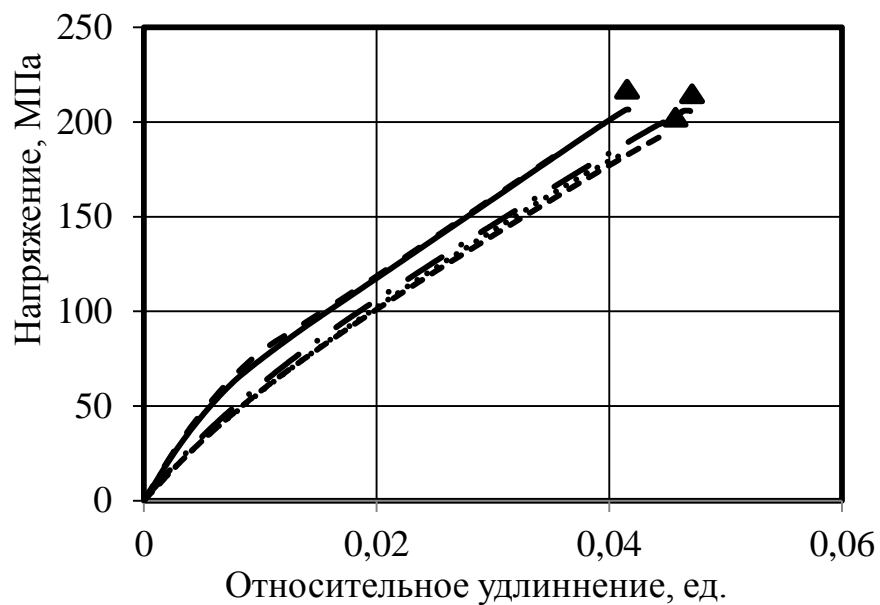
а)



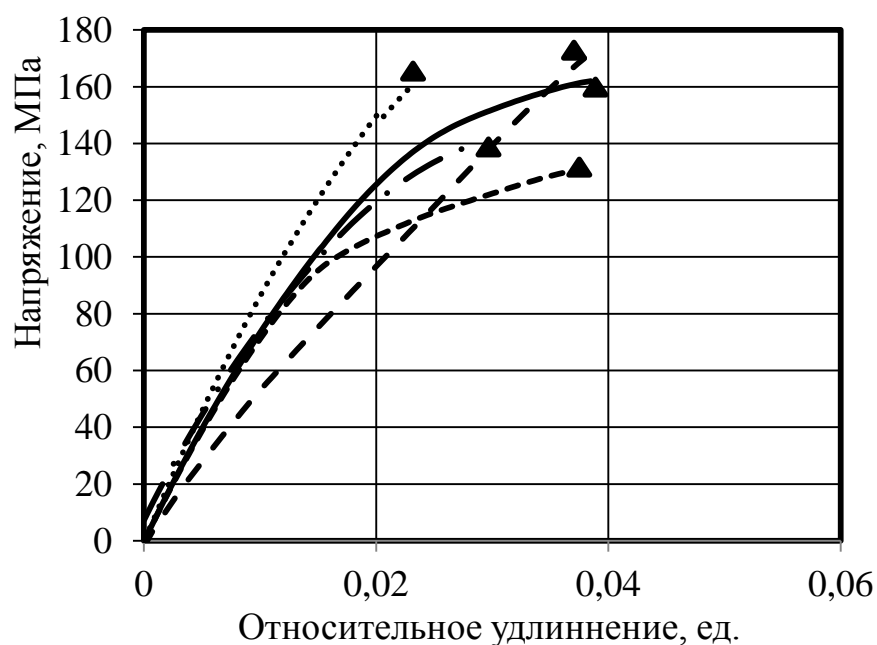
б)

Рисунок 41 – Схема (а) и результаты (б) испытаний образцов ХАСП на смятие

Испытано по пять образцов на растяжение и сжатие и два образца (шесть отверстий) на прочность при смятии на универсальной испытательной машине INSTRON 5882. Скорость движения траверсы составила 10 мм/мин, температура окружающей среды  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ . Диаграммы деформирования образцов показаны на рисунках 42, 43.



а)



б)

Рисунок 42 – Диаграммы деформирования образцов ХАСП при растяжении (а) и сжатии (б)

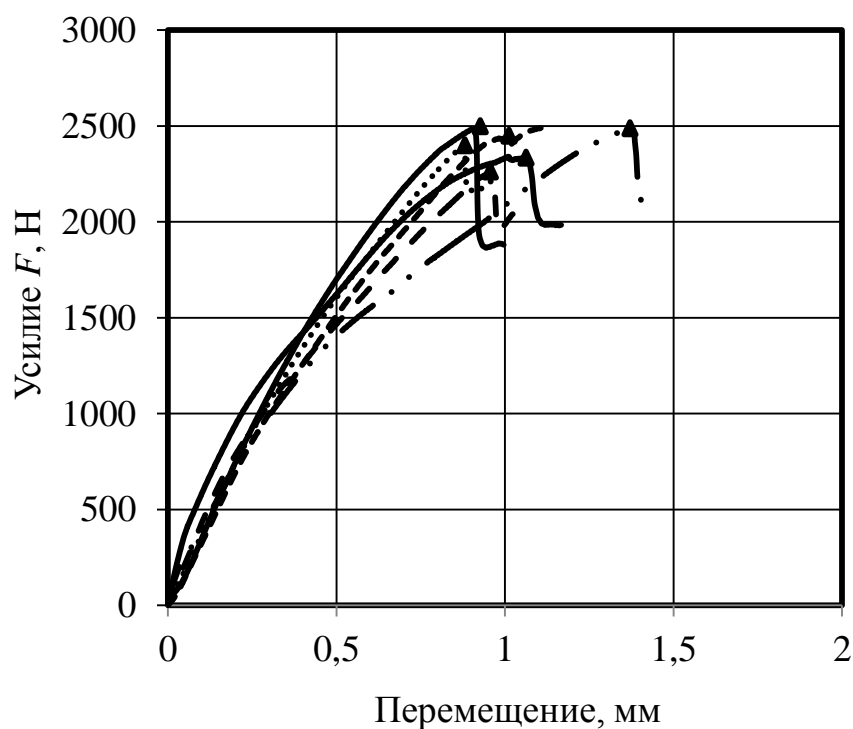


Рисунок 43 – Диаграммы деформирования образцов ХАСП при испытаниях на смятие отверстий (б)

Результаты испытаний после статистической обработки показаны в таблице 5. Как видно из диаграмм испытаний, при нагружении в плоскости армирования волокнами для ХАСП характерна нелинейность деформирования – псевдопластичность. Псевдопластичность в случае растяжения обусловлена постепенным проскальзыванием волокон относительно матрицы, их локальным разрушением. В случае сжатия псевдопластичность также связана с отделением волокон от матрицы, что способствует потере их устойчивости. Потеря устойчивости армирующих волокон также отвечает за более низкую прочность ХАСП при сжатии по сравнению с растяжением.

Предел прочности ХАСП на смятие (локальная прочность) в 1,6 раз выше предела прочности при растяжении и обладает сопоставимым разбросом результатов. Диаграммам испытаний свойственен заметный разброс по жесткости и деформациям разрушения, обусловленным стохастической природой ХАСП.

Таблица 5 – Результаты испытаний образцов ХАСП на растяжение, сжатие и смятие

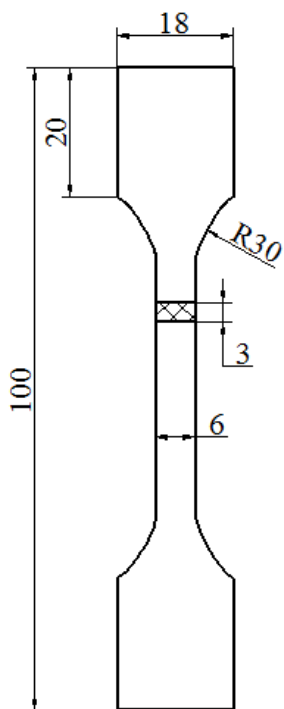
№	Предел прочности (растяжение), МПа	Модуль упругости (растяжение), ГПа	Коэффициент Пуассона (растяжение, при $\varepsilon = 0,02\%$ )	Предел прочности (сжатие), МПа	Предел прочности на смятие, МПа
1	186	12,7	0,24	160	333
2	208	13,7	0,25	141	320
3	211	13,8	0,2	161	327
4	199	12,9	0,26	131	311
5	189	13,7	0,21	170	332
6	–	–	–	–	300
Среднее	198,6	13,4	0,23	152,6	320
СКО	11,10	0,50	0,03	16,0	13,1
Коэффициент вариации, %	5,60	3,90	11,2	10,5	4,1

Определенные в результате испытаний механические характеристики ХАСП заложены в модели материалов МКЭ-моделей типовой панели (гл. 2) и клеемеханических соединений, армированных самонарезающими винтами, которые будут описаны ниже.

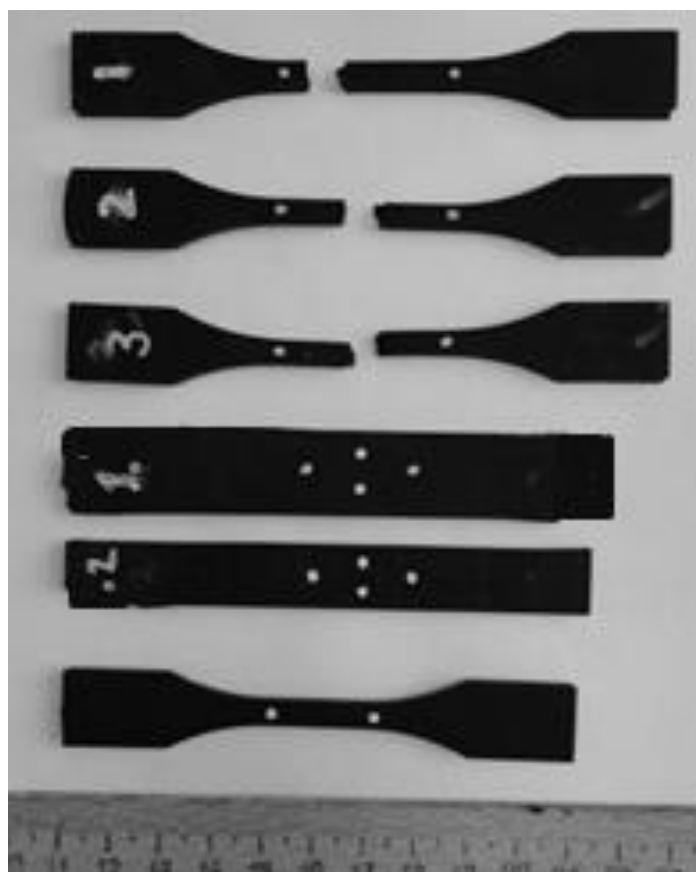
### 3.1.2 Испытания образцов эластичной клеевой композиции

В технических условиях на эластичные клеевые композиции не указываются диаграммы деформирования материала, позволяющие более адекватно учитывать его поведение при расчете клеемеханических соединений (возможная нелинейность диаграмм). В связи с этим, необходимо провести натурные испытания образцов при растяжении.

Для экспериментальных исследований были изготовлены стандартные образцы в форме двусторонней лопатки (5 шт., рисунок 44) и прямоугольной пластины (3 шт., рисунок 44) из полиуретанового низкомолекулярного герметика Terostat 8590 (отверждение проведено по рекомендациям производителя [182]).



а)



б)

Рисунок 44 – Эскиз (а) и фото некоторых натуральных образцов (б) эластичной клеевой композиции

Испытания на растяжение проведены на универсальной испытательной машине INSTRON 5882 (рисунок 45). Скорость движения траверсы 5 мм/мин. Деформация образца измерялась с помощью видеоэкстензометра AVE (рисунок 46).

Видеоэкстензометры используются для измерения деформации эластичных материалов под действием механической нагрузки, когда навесные экстензометры непригодны ввиду их жесткости и веса. Видеоэкстензометр использует цифровую камеру с высоким разрешением и обрабатывает изображения контрастных меток в режиме реального времени для точного измерения осевой и поперечной деформации образцов испытания.



Рисунок 45 – Вид образца с метками для испытаний на растяжение



Рисунок 46 – Видеоэкстензометр AVE

В результате испытаний получены диаграммы деформирования (рисунок 47).

При испытании одного из образцов произошло проскальзывание в захватах. Поэтому диаграмма напряжений данного образца отличается от остальных представленных диаграмм. Результаты испытаний после статистической обработки показаны в таблице 6.

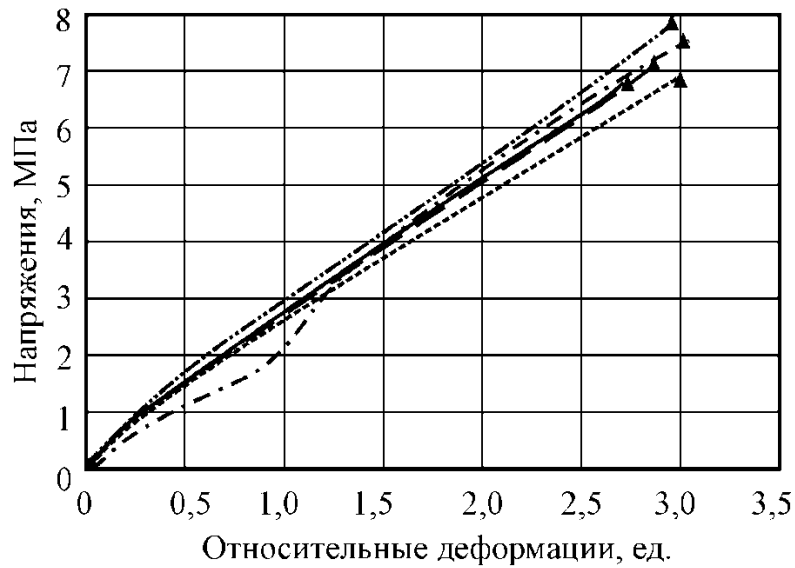


Рисунок 47 – Диаграммы деформирования при растяжении эластичной клеевой композиции

Таблица 6 – Результаты испытаний образцов эластичной клеевой композиции на растяжение

№.	Ширина $b$ , мм	Толщина $h$ , мм	Начальная длина $l_0$ , мм	Максимальная нагрузка $P_{max}$ , Н	Максимальное условное нормальное напряжение $\sigma_{max}$ , МПа
1	4,85	3,10	20,49	103,68	6,9
2	4,75	3,02	20,61	102,153	7,1
3	4,90	3,05	20,45	103,71	6,9
4	4,75	3,01	20,31	113,12	7,9
5	4,80	3,10	20,55	113,46	7,6
Среднее					7,3
СКО					0,4
Коэффициент вариации, %					6,2

Как показывают испытания клеемеханических соединений (см. ниже), сдвиговые деформации клевого шва в момент разрушения соединения не превышают 20%. Анализ диаграмм на рисунке 47 показывает, что на таких относительно малых деформациях клеевой слой ведет себя как линейно упругий



материал с модулем упругости  $\sim 4$  МПа на начальном участке диаграммы. При этом его диаграмма деформирования в истинных напряжениях не будет существенно отличаться от соответствующей диаграммы на рисунке 47.

Для определения коэффициента Пуассона испытаны прямоугольные образцы (рисунок 44б), т.к. определить поперечную деформацию на образцах с формой двусторонней лопатки затруднительно.

Испытания на растяжение проведены на универсальной испытательной машине INSTRON 5882. Скорость движения траверсы составляла 5 мм/мин. Деформация образца измерялась с помощью видеоэкстензометра AVE.

В результате испытаний получены зависимости «продольная деформация – поперечная деформация» (рисунок 48).

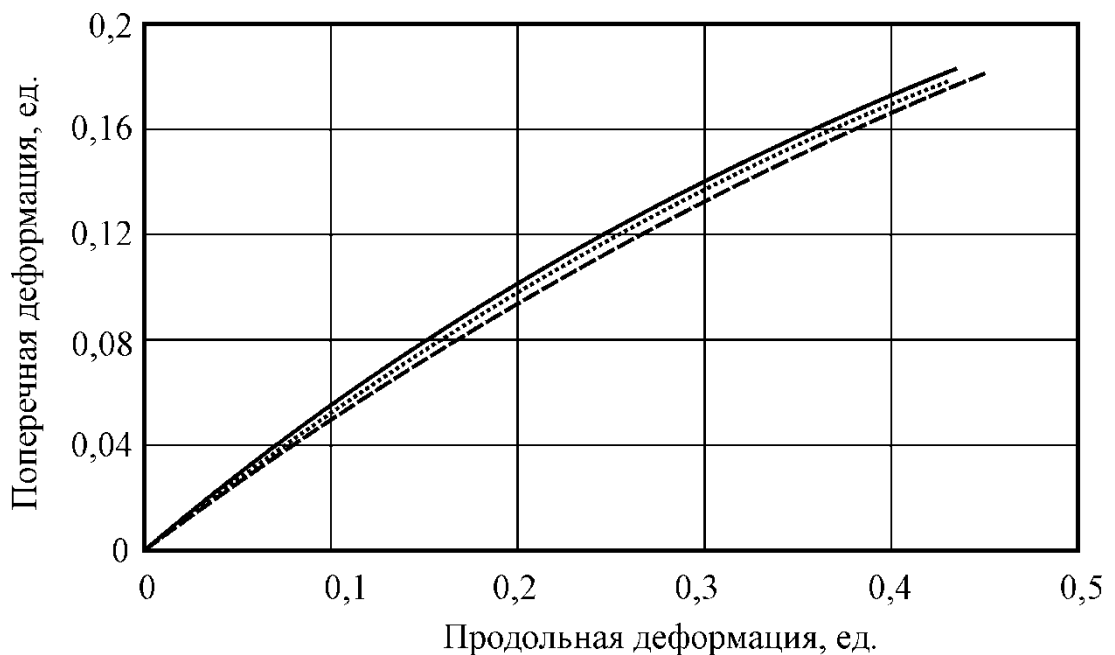


Рисунок 48 – Диаграммы «продольная деформация – деформация в поперечном направлении»

Результаты испытаний после статистической обработки показаны в таблице 7. Как видно из диаграмм, коэффициент Пуассона в диапазоне продольных деформаций 0-20% имеет значение  $\approx 0,48$ .

Таблица 7 – Коэффициент Пуассона для испытанных образцов эластичной клеевой композиции

№ обр.	Расстояние между вертикальными метками, мм	Расстояние между горизонтальными метками, мм	Коэффициент Пуассона
1	20,34	10,12	0,484
2	19,33	10,05	0,464
3	20,51	10,14	0,494
Среднее			0,481
СКО			0,015
Коэффициент вариации, %			3,2

### 3.1.3 Испытания самонарезающих винтов

Как было отмечено выше, существуют различные стандарты по определению механических свойств материалов винтов [163, 164], которые включают в себя типовой набор испытаний на твердость, анализ микроструктуры материала, а также испытаний на прочность при скручивании. В связи с тем, что в каркасно-панельном кузове самонарезающие винты будут работать при сдвиговых нагрузках, в рамках исследования необходимо провести соответствующие испытания, позволяющие получить оценки статической прочности винтов. Для достижения граничных условий, близких к работе винтов в натурной конструкции, при испытаниях использованы образцы нахлесточных механических соединений типа «сталь-сталь». Эскиз, схема испытаний, а также фото образцов показаны на рисунке 49.

Металлические пластины образцов изготовлены из горячекатаного стального листа по ГОСТ 19903-74 [188] (материал – Сталь 3, толщина 2 мм). В качестве механических элементов использованы универсальные самонарезающие винты по DIN 7962 [162] с цинковым покрытием, имеющие диаметр 2,5 мм и длину 10 мм.

Перед армированием в образцах были изготовлены сквозные технологические отверстия: диаметром 2 мм. Диаметр отверстий подобран из условия неразрушения винта при вкручивании. Сверление проведено при помощи

высокопрочного сверла с алмазным напылением для металлических изделий со скоростью вращения 3000 об/мин и подачей 0,01 мм/об.

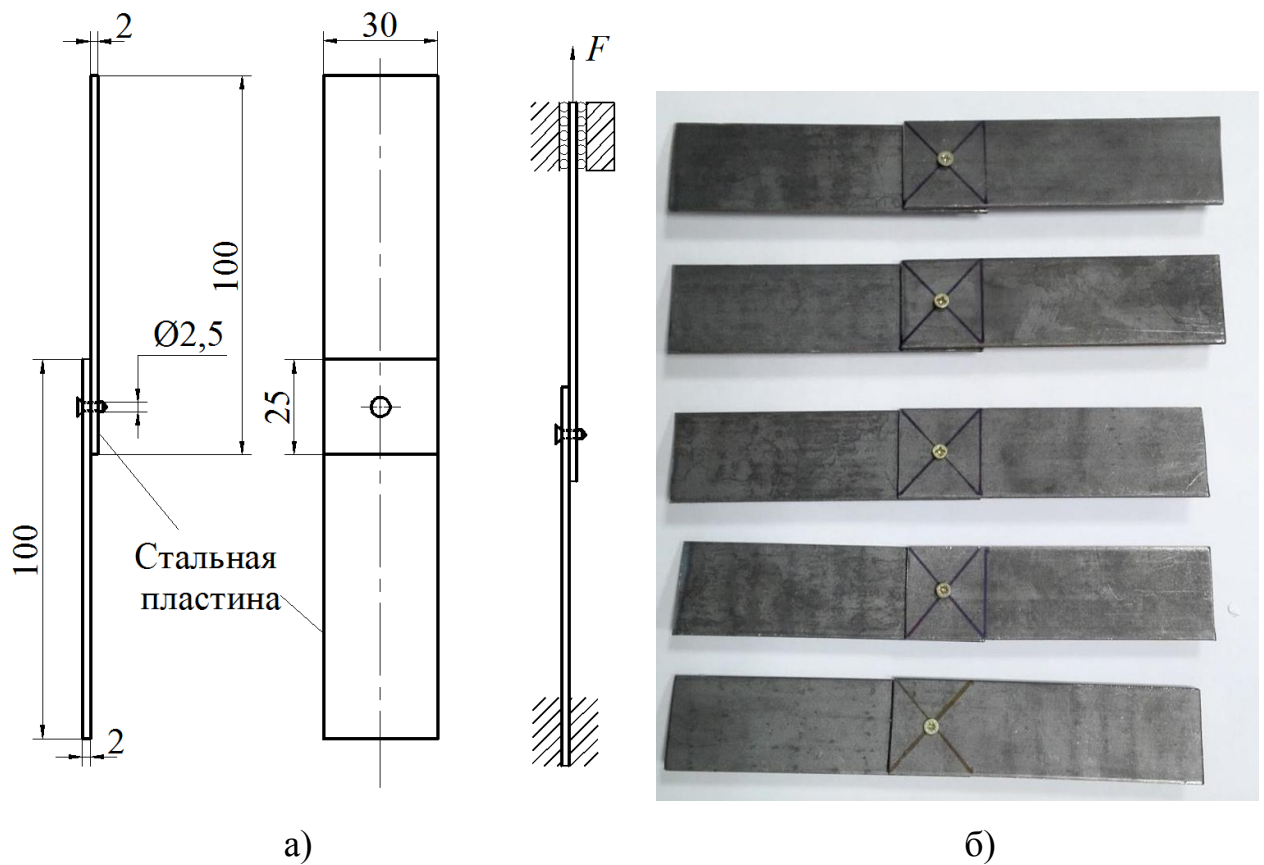


Рисунок 49 – Эскиз, схема испытаний (а) и фото (б) образцов для испытаний на прочность самонарезающих винтов

Затяжка винтов была ограничена трещеткой отвертки, обеспечивающей плотный, но с возможностью проворота, контакт листов. Испытано пять образцов на растяжение на универсальной испытательной машине INSTRON 5882. Скорость движения траверсы 10 мм/мин, температура окружающей среды  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ . Диаграммы деформирования образцов показаны на рисунке 50.

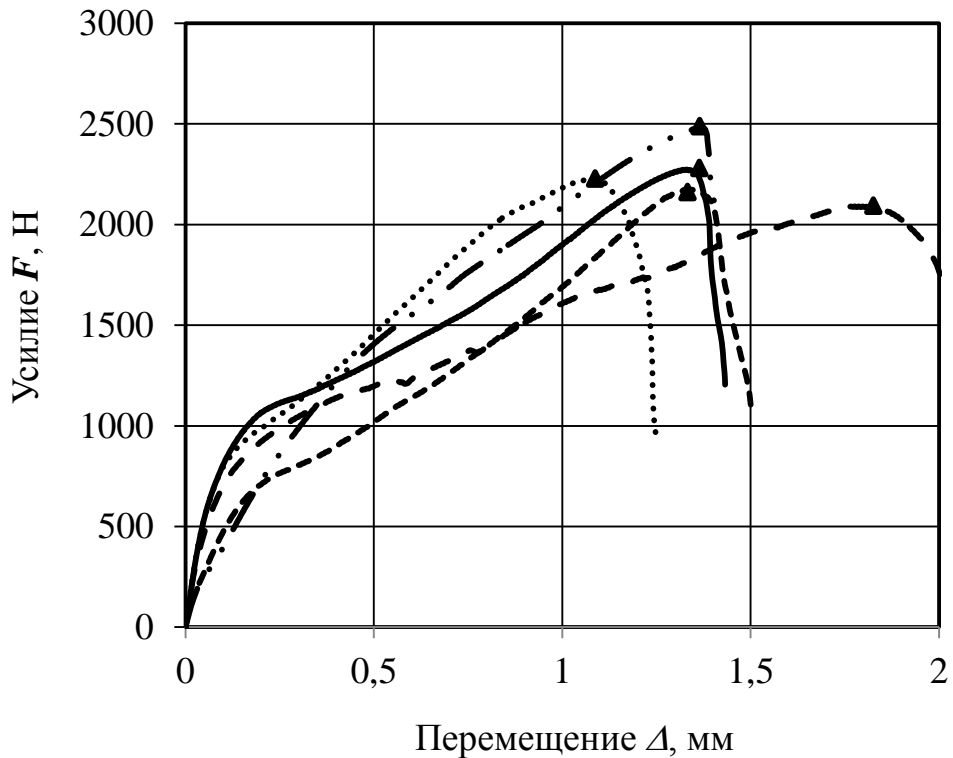


Рисунок 50 – Диаграммы деформирования образцов для испытаний самонарезающих винтов на прочность

Результаты испытаний после статистической обработки показаны в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты испытаний на прочность самонарезающих винтов.

№	Вид разрушения	Предельная нагрузка, Н
1	Срез	2500
2	Срез	2200
3	Срез	2280
4	Срез	2050
5	Срез	2150
Среднее		2236
СКО		169,5
Коэффициент вариации, %		7,6

Как видно из рисунка 50, испытанным образцам свойственно существенно нелинейное поведение и некоторый разброс предельных нагрузок, которые

обусловлены соответствующим разбросом механических свойств материала самонарезающих винтов, а также взаимодействием винтов и стальных пластин в области отверстий.

### 3.1.4 Испытания механических соединений типа «композит-сталь»

Для определения вида зависимости (2), использованной в предложенном выше способе управления жесткостью клеемеханических соединений типа «композит-сталь», армированных самонарезающими винтами (подраздел 2.2), проведены экспериментальные исследования образцов нахлесточных механических соединений с переменным зазором между пластинами (рисунок 51).

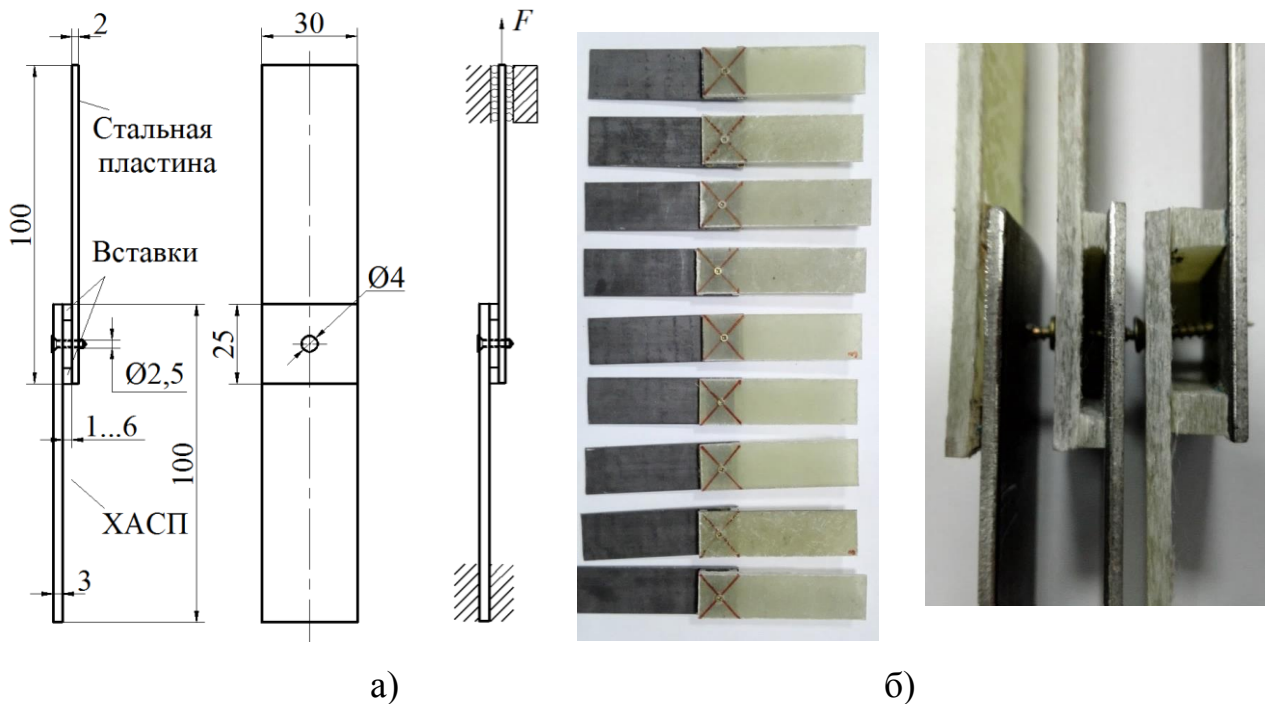


Рисунок 51 – Эскиз, схема испытаний (а), а также фото (б) образцов механических соединений для испытаний на жесткость

В качестве механических элементов использованы самонарезающие винты по DIN 7962 [162] с цинковым покрытием, имеющие диаметр 2,5 мм и длину 10 мм (для соединений с зазором между пластинами 1 и 3 мм) и 16 мм (для соединений с зазором 6 мм) с фиксированным усилием затяжки.

Стальные пластины и технологические отверстия под самонарезающие винты выполнены аналогично образцам, описанным в пункте 3.1.3. Пластины из ХАСП выполнены аналогично образцам из п. 3.1.1. Сверление ХАСП проводили на подложке из древесины, что обеспечило отсутствие повреждений стеклопластика [77] при выходе сверла. Проведена также зенковка отверстий со стороны стеклопластиковой пластины сверлом диаметром 4 мм с углом заточки  $120^\circ$  на глубину 1,5 мм. Соединения изготовлены без использования клеевого шва, переменный зазор при этом обеспечивается за счет вставок из ХАСП по краям нахлеста. Вставки удерживаются в зазоре за счет сил трения, возникающих при контролируемой затяжке самонарезающего винта.

Испытано по три образца с зазором между пластинами 0, 1, 3 и 6 мм. Каждый образец нагружен три раза, затем результат усреднен. Испытания проведены на универсальной испытательной машине INSTRON 5882. Скорость движения траверсы составила 10 мм/мин, температура окружающей среды:  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ . Диаграммы деформирования образцов приведены в приложении Б.2.

Оценка жесткости произведена для значения силы  $F_{\max} = 50$  Н, что близко к пределу ограниченной выносливости исследуемых соединений (см. подраздел 4.3). Значения перемещений  $\Delta_{sc}$  траверсы испытательной машины при отмеченной нагрузке и соответствующая аппроксимация их зависимости от величины зазора  $h$  между пластинами приведены на рисунке 52. Для аппроксимации полученной экспериментальной зависимости выбран полином второго порядка:

$$\Delta_{sc}(h) = 1,354 \cdot 10^{-3} \cdot h^2 + 0,0145 \text{ (мм)}. \quad (7)$$

Эмпирическая зависимость жесткости образцов механических соединений от величины зазора между пластинами определяется выражением:

$$C_{sc}(h) = \frac{F_{\max}}{\Delta_{sc}(h)} = \frac{50}{1,354 \cdot 10^{-3} \cdot h^2 + 0,0145} \text{ (Н/мм)}. \quad (8)$$

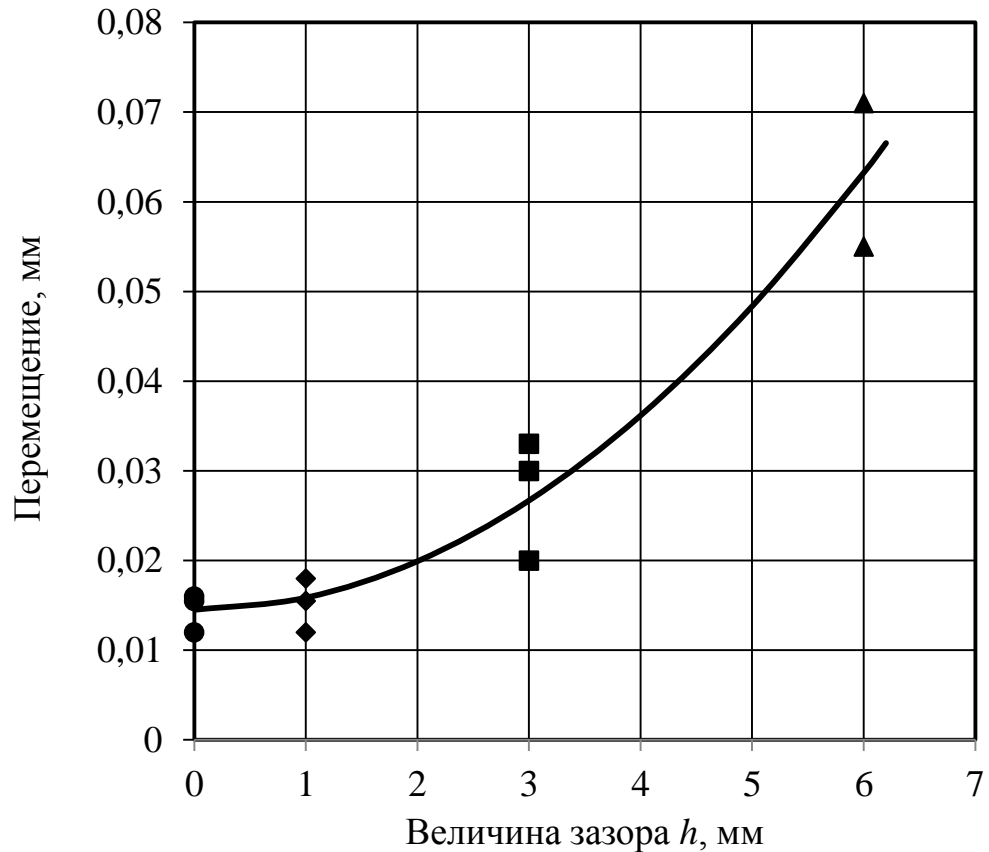


Рисунок 52 – Перемещение концов нахлеста образцов механических соединений в зависимости от зазора между пластинами

### 3.2 Расчетно-экспериментальный анализ механического поведения клеемеханических соединений с композитными элементами при квазистатическом нагружении

Расчетно-экспериментальный анализ механического поведения клеемеханических соединений пластин из ХАСП, необходим для подтверждения эффективности использования самонарезающих винтов в качестве армирующих элементов, а также для разработки соответствующего расчетного инструментария методики проектирования каркасно-панельного кузова с макрогеометрическими отклонениями (пункт (д), подраздел 2.3). В испытаниях исследованы образцы соединений типа «композит-композит», т.к. наибольший вклад в потерю жесткости и наступление предельного равновесия соединений типа «композит-сталь» вносит взаимодействие армирующих элементов с полимерным

композитом, имеющим на два порядка более мягкую полимерную матрицу, чем сталь.

Были проведены испытания трех групп образцов:

- клеевые нахлесточные соединения;
- клеемеханические нахлесточные соединения, усиленные стальными самонарезающими винтами по DIN 7962 с цинковым покрытием, имеющими диаметр 2,5 мм [162];
- клеемеханические нахлесточные соединения, усиленные алюминиевыми заклепками диаметром 4 мм [189].

Эскиз клеемеханического соединения, армированного самонарезающими винтами, показан на рисунке 53а.

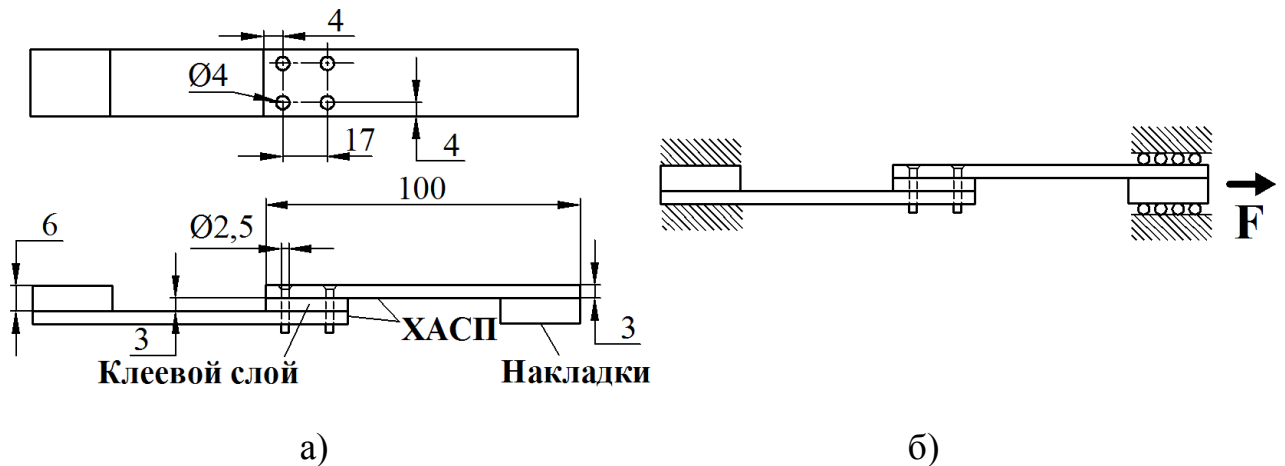


Рисунок 53 – Эскиз образца клеемеханического соединения (а) и схема его нагружения (б)

Пластины из ХАСП изготовлены методом контактного формования на основе стекломата плотностью  $300 \text{ г/м}^2$  и полиэфирной смолы марки Arapol S19 TA с катализатором Butanox M-50 [185]. Отверждение заготовок стеклопластиковых пластин проведено при комнатной температуре в течение 24 часов с последующим постотверждением в сушильном шкафу в течение 4 часов при температуре  $70^\circ\text{C}$ .

Склейка пластин произведена на основе полиуретанового низко модульного герметика Terostat 8590. Процесс склейки, включая подготовку поверхностей,



нанесение клеевой композиции и последующее отверждение, проведен согласно рекомендациям производителя [182]. Фотографии образцов показаны на рисунке 54. Перед армированием в образцах были изготовлены сквозные технологические отверстия: диаметром 2 мм (диаметр подобран из условия неразрушения винта при вкручивании) для самонарезающих винтов и 4 мм – для заклепок. Сверление проведено при помощи высокопрочного сверла с алмазным напылением для металлических изделий со скоростью вращения 3000 об/мин и подачей 0,01 мм/об. Произведена также зенковка отверстий под самонарезающие винты со стороны стеклопластиковой пластины сверлом диаметром 4 мм с углом заточки 120° на глубину 1,5 мм.

Испытано по пять образцов на растяжение на универсальной испытательной машине INSTRON 5882. Скорость движения траверсы 10 мм/мин, температура окружающей среды  $23\pm 1^\circ\text{C}$ .

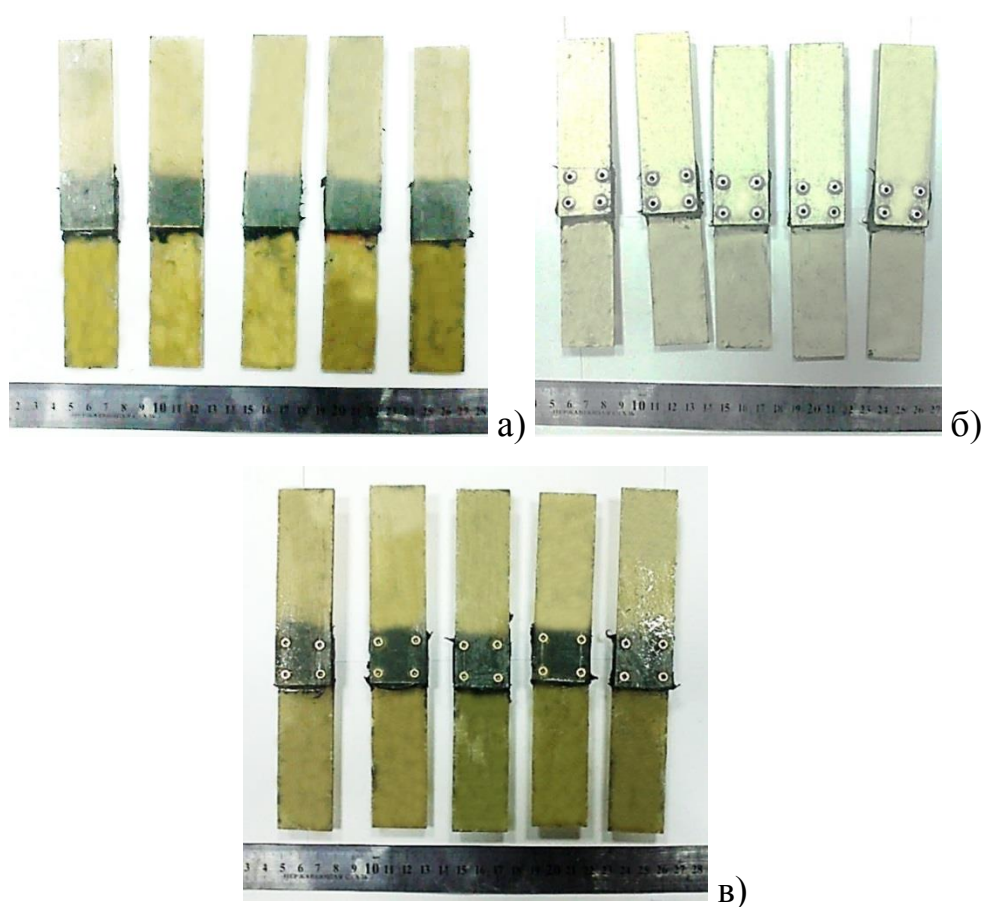


Рисунок 54 – Фото натуральных образцов клеевых (а) и клеємеханчических нахлесточных соединений, армированных заклепками (б) и самонарезающими винтами (в)

Схема испытаний показана на рисунке 53б. Диаграммы деформирования образцов показаны на рисунках 55 и 56.

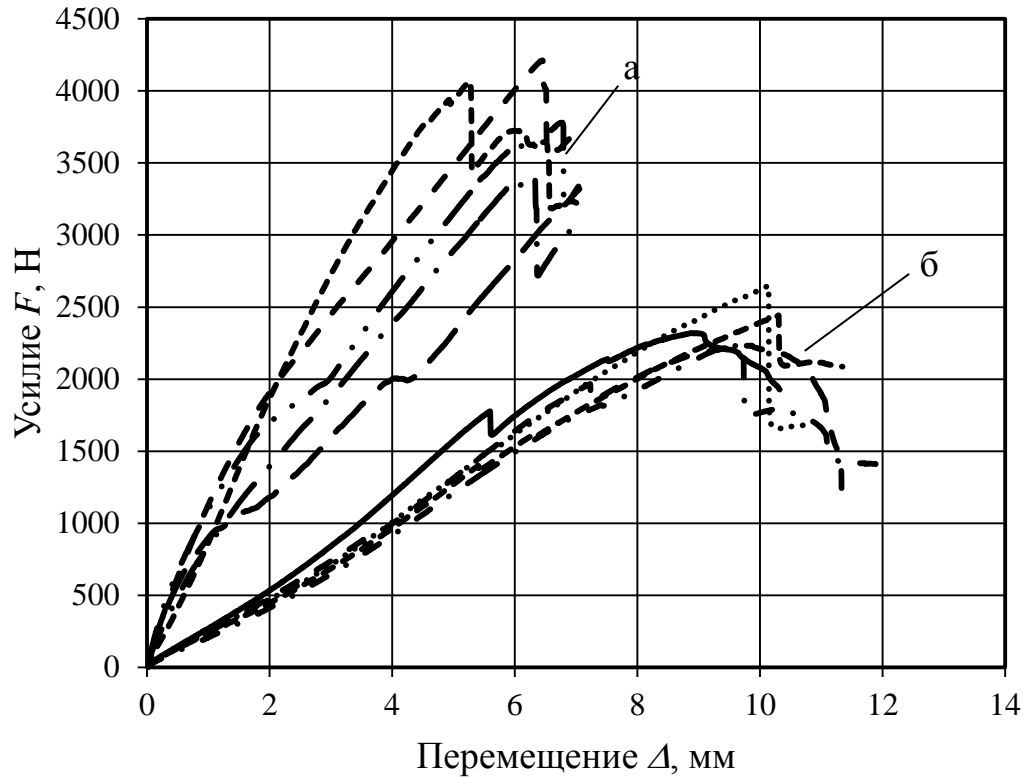


Рисунок 55 – Диаграммы «Усилие-перемещение» для образцов клеевых соединений (а) и армированных самонарезающими винтами (б).

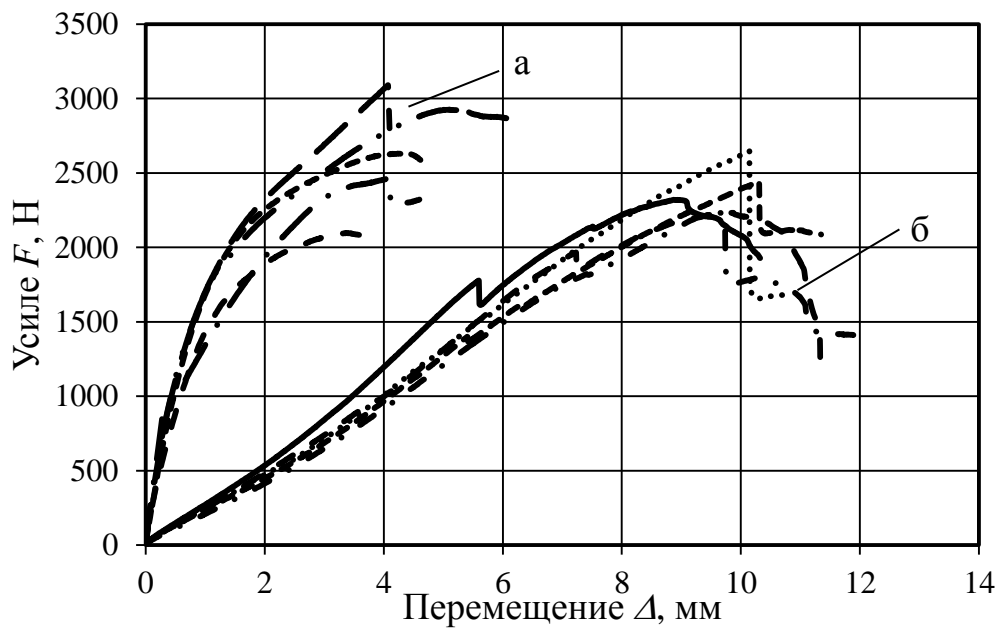


Рисунок 56 – Диаграммы «Усилие-перемещение» для образцов клеевых соединений (а) и армированных вытяжными заклепками (б)

Результаты испытаний после статистической обработки показаны в таблице 9. Испытания соединений показали увеличение предельной нагрузки, составляющее в среднем 40% для резьбовых z-элементов и 10% для заклепочных по сравнению с чисто клеевыми. Разрушение в первом случае происходило путем среза армирующих элементов, во втором – путем одновременного роста трещин в стеклопластике, начинающихся от отверстий, и среза армирующих элементов. Разрушение клеевых соединений происходило по смешанному адгезионно-когезионному механизму. Следует отметить, что испытанные соединения имели по четыре армирующих элемента, следовательно, гарантированная нагрузка, которая может быть воспринята соединением, армированным одним самонарезающим винтом, составляет  $\approx 815$  Н.

Таблица 9 – Результаты испытаний нахлесточных соединений на прочность при однократном нагружении

Тип соединения		Клеевое	Усиленное заклепками	Усиленное самонарезающими винтами
Предельная нагрузка, Н	Среднее	2390	2985	3720
	СКО	176	970	454
	Коэффициент вариации, %	7,4	32,5	12,2
Податливость при нагрузке $50 \text{ Н}^{1)}$ , $1 \cdot 10^{-7}$ м/Н	Среднее	34,1	3,4	7,5
	СКО	15,2	0,6	2,6
	Коэффициент вариации, %	44,5	17,1	35,3
Остаточное трансверсальное сжатие клеевого слоя, %		–	30	5
1) Предел ограниченной выносливости соединений, армированных самонарезающими винтами (см. гл. 4)				

Разброс результатов испытаний усиленных соединений обусловлен соответствующими разбросами механических характеристик ХАСП и армирующих элементов, экспериментально выявленными в подразделе 3.1.

В научной литературе имеются работы, в которых представлены более неблагоприятные оценки неоднородности механических свойств ХАСП, чем та, что получена автором. В частности, в работе [79] показаны результаты испытаний на смятие отверстий в пластинах из ХАСП со средней толщиной 3,5 мм. Статистическая обработка экспериментальных данных для отверстий диаметром 4 мм и 5 мм показывает, что коэффициент вариации предела прочности на смятие до 4,3 раз выше, чем коэффициент вариации предела прочности того же материала с осредненными свойствами, полученного из испытаний на растяжение образцов без отверстий. Значительный разброс локальной жесткости ХАСП показан также в [190]. Локальная жесткость была оценена при помощи контактного индентирования пластины, изготовленной методом ручного контактного формования из 4 слоев стекломата (толщина 2 мм). В работе показано, что увеличение толщины (или количества слоёв ХАСП) приводит к уменьшению дисперсии пропорционально квадратному корню из числа слоёв или толщины ХАСП.

Характерные скачки на диаграммах деформирования образцов клеевых соединений вызваны местным отслаиванием клеевого шва на концах нахлеста.

Самонарезающие винты демонстрируют лучшие усиливающие свойства с точки зрения предельной нагрузки при однократном нагружении. Однако в области малых значений нагрузок, характерных для многоциклового усталости (см. гл. 4), жесткость соединений, усиленных заклепками, практически в 2 раза выше, чем у аналогов с самонарезающими винтами.

Существенным недостатком односторонних заклепок являются остаточные трансверсальные нагрузки, которые после монтажа элементов приводят к значительному сжатию низко модульного клеевого слоя (толщина снижается на 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.

### **3.3 Разработка МКЭ-модели клеемеханического нахлесточного соединения, армированного самонарезающими винтами**

Для проведения анализа напряженного состояния соединений в пакете ANSYS Mechanical были созданы конечно-элементные модели, учитывающие нелинейность механического поведения материалов и концентрацию напряжений в области отверстий под самонарезающие винты.

Так как ХАСП является псевдоизотропным материалом, для него была выбрана билинейная модель с изотропным «пластическим» упрочнением (псевдопластичность в данном случае является отражением накопления рассеянных микрповреждений, см. диаграммы испытаний в подразделе 3.1). Константы модели  $E_0$ ,  $\sigma_T$  и  $E_{T0}$  (рисунок 57) определены из диаграмм деформирования, полученных при испытаниях лопаточных образцов на растяжение, при этом модуль упругости взят как осредненный угол наклона диаграмм на участке до выраженного излома диаграммы деформирования (подраздел 3.1).

Для материала клеевого шва использована двухпараметрическая модель гиперупругости Муни-Ривлина [106]. Константы модели определены путем аппроксимации диаграмм деформирования лопаточных образцов, полученных при квазистатическом растяжении (подраздел 3.1). Использование гиперупругой модели обусловлено тем, что применение модели линейного упругого материала приводило к ошибкам решателя программного пакета ANSYS для опции «большие перемещения» (учет геометрической нелинейности).

Для материала самонарезающих винтов использована идеально-упругопластическая модель деформирования. Расчетный диаметр самореза принят по его «живому» сечению (внутренний диаметр резьбовой части).

Расчетная схема и конечно-элементная модель нахлесточного усиленного соединения показана на рисунках 53б и 58 соответственно. Для косвенного учета

начальных повреждений в ХАСП, вносимых монтажом самонарезающего винта, в зоне отверстий использовался псевдоизотропный идеально-упругопластический материал с редуцированным модулем упругости  $E$  (рисунки 57, 59).

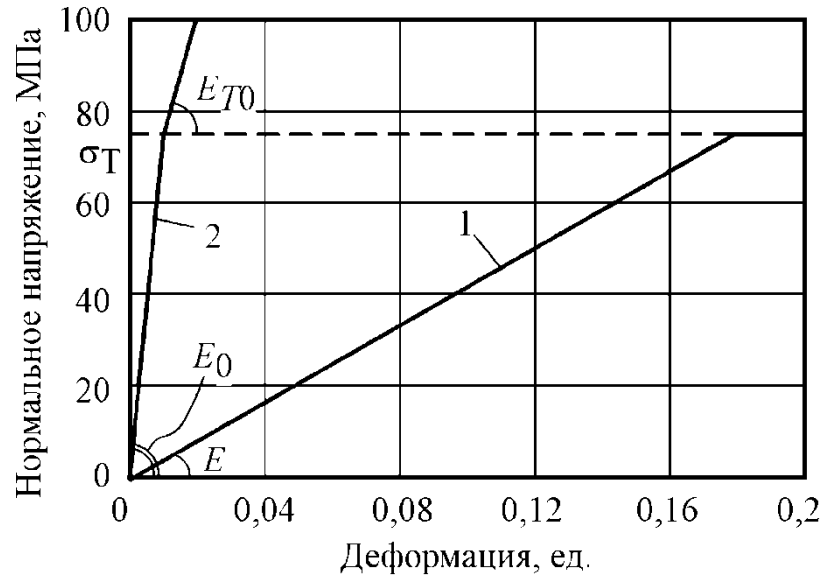


Рисунок 57 – Идеально-упругопластическая модель материала ХАСП с начальными повреждениями (1) и схематизированная диаграмма деформирования материала ХАСП (2)

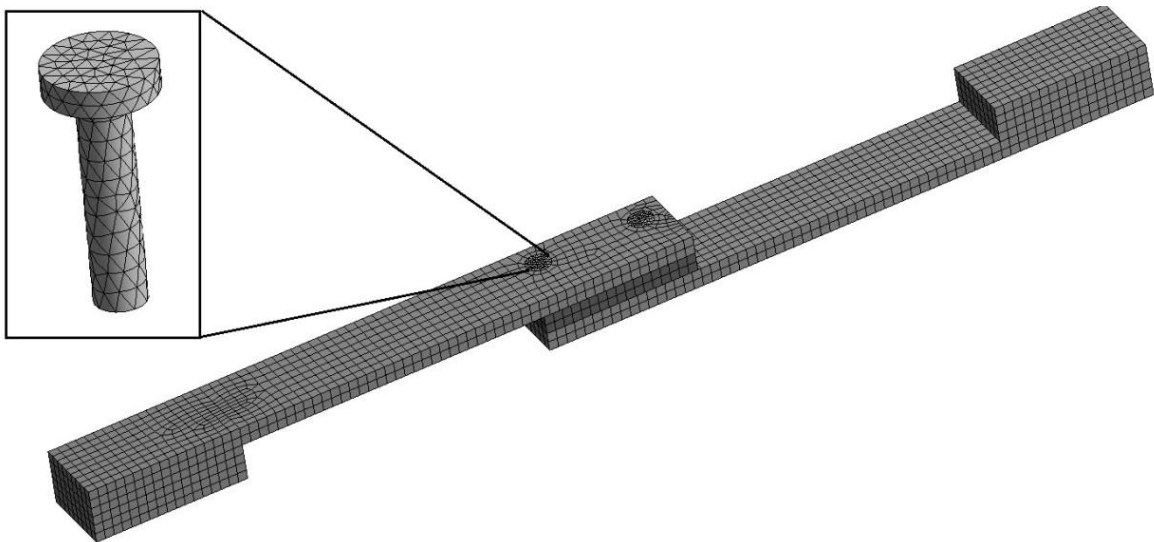


Рисунок 58 – МКЭ-модель одностороннего нахлесточного соединения

Для моделирования использованы объемные квадратичные элементы типа Solid187.

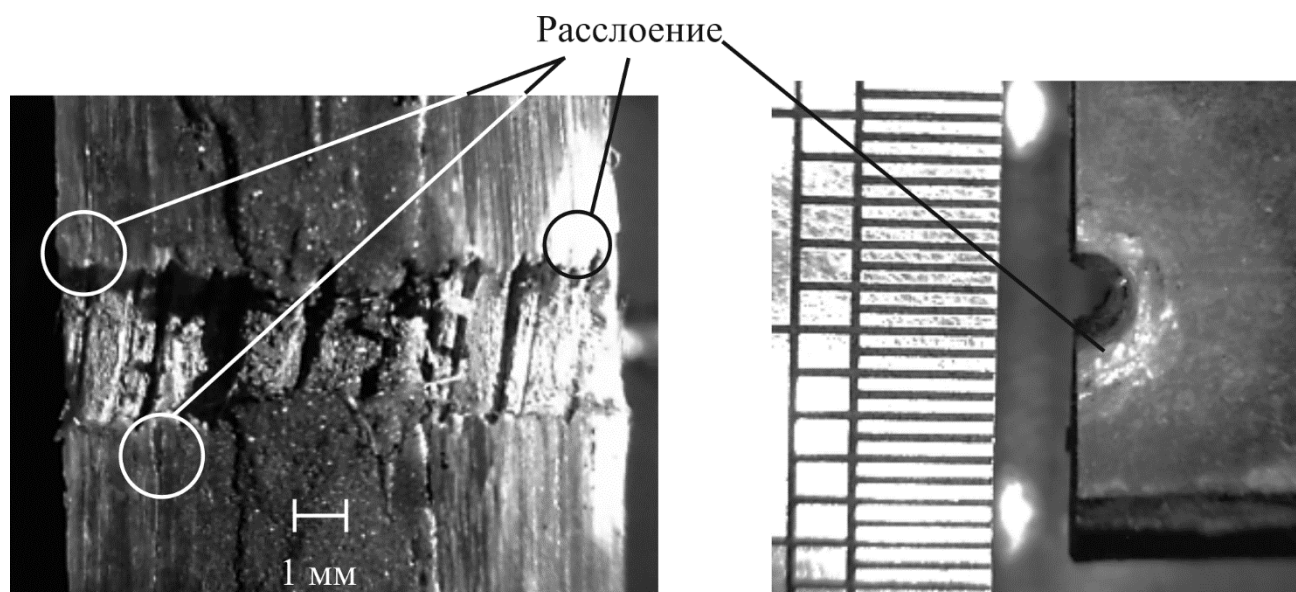


Рисунок 59 – Повреждения ХАСП в результате сверления отверстия и монтажа армирующего элемента

Расчетная модель имеет особенности, затрудняющие сходимость численного решения рассматриваемой задачи:

- геометрическая нелинейность, связанная с существенным поворотом зоны нахлеста (порядка  $15^\circ$ ) и соответствующим перераспределением усилий в элементах соединения;

- наличие упругопластических моделей материалов и как следствие, возникновение значительных пластических деформаций МКЭ-моделей винта и поврежденного ХАСП при предельной нагрузке.

Для учета геометрической нелинейности включена встроенная опция решателя ANSYS «Большие перемещения» (Large displacements). В местах взаимодействия армирующих элементов и стеклопластика использованы контактные алгоритмы «склейки» (Bonded). Использование контактов с возможностью размыкания осложнено различием модулей упругости контактирующих материалов на два порядка (материалы самонарезающего винта и поврежденного материала ХАСП), использованием упругопластических моделей деформирования для отмеченных материалов.

В данной задаче устойчивость решения контролировали при помощи адаптивного изменения шага по нагрузке в заданном диапазоне (кинематическое нагружение) при помощи встроенных алгоритмов ANSYS (auto time stepping). Кроме того, варьировали характерный размер конечного элемента в диапазоне 1-2 мм для зон предполагаемого течения материала. Границы диапазона приняты в соответствии с требованиями к минимальному характерному размеру конечного элемента, достаточного для адекватного усреднения по объему свойств полимерного волокнистого композитного материала [191]. Для обеспечения достаточной устойчивости и точности результатов шаг по нагрузке (перемещение захвата) был ограничен диапазоном 0,008-0,8 мм, минимальный размер конечного элемента равен 1,5 мм.

Параметры упругопластической модели ХАСП с редуцированными упругими свойствами (модуль  $E$ ), предела текучести  $\sigma_T$  модели материала самонарезающих винтов, а также диаметра цилиндрической области  $d$  (рисунок 60) найдены из условия наилучшего соответствия экспериментальных и расчетных диаграмм «усилие-перемещение». Диапазоны варьирования параметров составили:  $2,5 \leq d \leq 3$  мм;  $0,25 \leq E \leq 12$  ГПа;  $100 < \sigma_T \leq 450$  МПа.

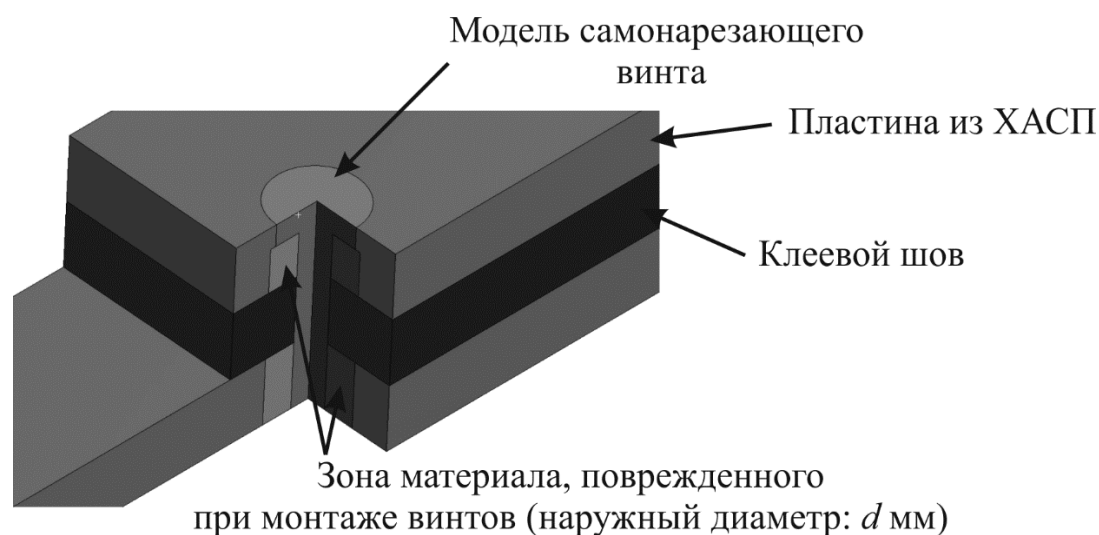


Рисунок 60 – Повреждения в стеклопластике в результате сверления отверстия и монтажа армирующего элемента (а) и их учет в МКЭ-модели (б)

Параметры моделей материалов, использованных в МКЭ-модели, приведены в таблицах 10, 11.



Таблица 10 – Параметры упруго-пластических моделей материалов нахлесточного соединения

Материал	Модуль упругости, $E$ (ГПа)	Предел текучести, $\sigma_T$ (МПа)	Модуль упрочнения $E_T$ (ГПа)
ХАСП	7,5	75	4
ХАСП с начальными повреждениями	0,4	75	0
Сталь армирующих винтов	200	420	0

Таблица 11 – Параметры гиперупругой модели материала Муни-Ривлина для клеевого шва

Материал	Параметр $C_{10}$	Параметр $C_{01}$	Параметр несжимаемости
Эластичный клеевой шов	728000	55400	0

Расчетная диаграмма деформирования образца нахлесточного клеомеханического соединения, армированного самонарезающими винтами, представлена на рисунке б1.

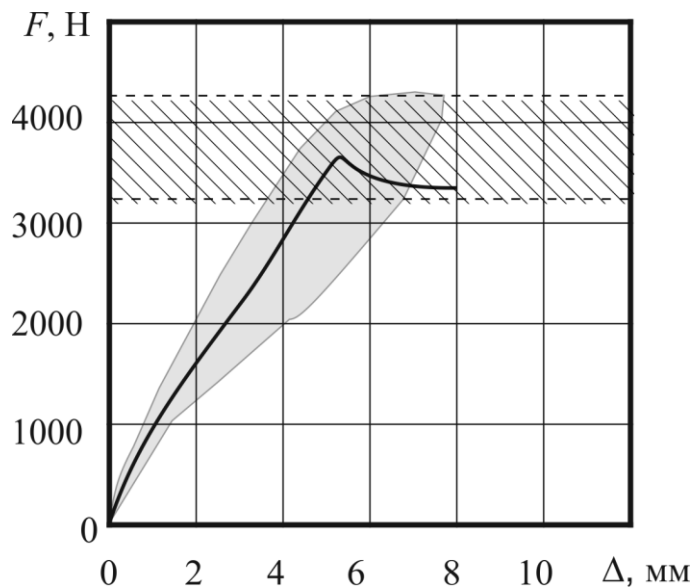


Рисунок б1 – Расчетная диаграмма статического деформирования клеомеханического соединения армированного самонарезающими винтами.

Линия – расчет, закрашенная и заштрихованная области – разброс экспериментальных данных.

Разработанная численная модель позволяет получить оценку предельной нагрузки и предельных перемещений в полосе разброса экспериментальных результатов. Модель предлагается использовать в составе методики проектирования каркасно-панельного кузова с макрогеометрическими отклонениями (гл. 2). При этом расчетное сдвиговое усилие на соединение в составе конструкции по аварийному режиму (режим I для трамвайного вагона, гл. 2) подставляется в рассчитанную с помощью разработанной МКЭ-модели диаграмму деформирования соединения с одним винтом, при этом длина нахлеста может изменяться в соответствии с назначенным шагом армирования.

Следует отметить, что в силу введенных допущений модель является преимущественно эмпирической и требует повторного проведения испытаний для самонарезающих винтов существенно отличающихся диаметров. Подробное описание МКЭ модели показано в приложении А.

Расчет сдвиговых нагрузок на наиболее нагруженный участок соединения реального низкопольного трамвая (формула (4), шаг армирования  $p = 50\text{мм}$ ) по методике, изложенной в главе 2, 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).

### **3.4 Выводы по главе**

В главе представлены результаты экспериментальных исследований, позволивших получить данные о механических характеристиках хаотически армированного стеклопластика (ХАСП), изготовленного методом контактного формования и являющимся наиболее рентабельным в условиях мелкосерийного производства обшивок сэндвич-панелей каркасно-панельного кузова. Оценены значения модуля упругости  $E_0$  (псевдоизотропия ХАСП в плоскости армирования стеклянными волокнами), коэффициента Пуассона  $\mu$ , пределов прочности материала при растяжении и сжатии.

Получены нелинейные диаграммы деформирования материала клеевого шва (полиуретанового герметика марки Terostat 8590). Была использована двухпараметрическая модель гиперупругости Муни-Ривлина. Константы модели

определены путем аппроксимации диаграмм деформирования лопаточных образцов клеевого слоя, полученных при квазистатическом растяжении.

Проведен расчетно-экспериментальный анализ механического поведения клеомеханических соединений при квазистатическом нагружении до разрушения. Испытаны неармированные образцы (клеевые соединения), а также образцы с двумя типами армирующих элементов: вытяжными алюминиевыми заклепками диаметром 4 мм и самонарезающими винтами диаметром 2,5 мм.

Анализ результатов показал, что клеомеханические соединения демонстрируют увеличение предельной нагрузки, составляющее в среднем 40% для резьбовых армирующих элементов и 10% – для заклепочных, по сравнению с чисто клеевыми. Разрушение в первом случае происходило путем среза армирующих элементов, во втором – путем одновременного роста трещин в стеклопластике, начинающихся от отверстий, и среза армирующих элементов. Разрушение клеевых соединений происходило по смешанному адгезионно-когезионному механизму.

Существенным недостатком односторонних заклепок являются значительные трансверсальные нагрузки, которые после монтажа элементов приводят к обжатию низко модульного клеевого слоя (снижение толщины 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.

На основании полученных экспериментальных данных подтверждена эффективность клеомеханических соединений на основе низко модульных клеевых композиций с использованием самонарезающих винтов.

Разработана оригинальная конечно-элементная модель нахлесточного клеомеханического соединения, отличающаяся учетом физической и геометрической нелинейности 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.

## ГЛАВА 4. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КЛЕЕМЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ, АРМИРОВАННЫХ САМОНАРЕЗАЮЩИМИ ВИНТАМИ

Как отмечалось в гл. 1, самонарезающие винты (шурупы), обладают высокой технологичностью и несущей способностью, что позволило им широко распространиться в изделиях из дерева [152, 153]. Однако ряд исследователей [83, 16, 155] выражают сомнения в эффективности применения самонарезающих винтов в циклически нагружаемых соединениях полимерных волокнистых композитов. Это мотивировано локальным разрушением 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.

В данной главе предложена новая методика оценки *многоциклового* прочности клеемеханических соединений с использованием информации об изменении податливости соединений при проведении лишь *малоцикловых* испытаний. Предложен также метод существенного повышения долговечности таких соединений при действии циклических нагрузок. Это позволило составить полный набор численных моделей, используемых в составе методики проектирования каркасно-панельного кузова с макрогеометрическими отклонениями (гл. 2).

### **4.1 Способ повышения долговечности клеемеханических соединений, армированных самонарезающими винтами**

Как было отмечено выше, относительная низкая долговечность соединений с самонарезающими винтами обусловлена локальным разрушением 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.

Для снижения указанных начальных дефектов предлагается дополнительная обработка технологических отверстий под самонарезающие винты в следующей последовательности. Предварительно смонтированные самонарезающие винты выкручиваются из технологических отверстий, после чего в отверстия при помощи шприца вводится полиэфирная композиция марки Agorol S19 TA. Выкрученные самонарезающие винты, предварительно погруженные в ту же полиэфирную композицию, повторно монтируются в образцы. Далее проводится отверждение полиэфирной композиции в отверстиях при комнатной температуре в течение 24 часов. Обработка полиэфирной композицией приводит также к увеличению эффективной площади контакта винтов и соединяемых деталей. Фотографии поперечных разрезов образцов соединений с обработкой по предложенному методу и без него показаны на рисунке 62.

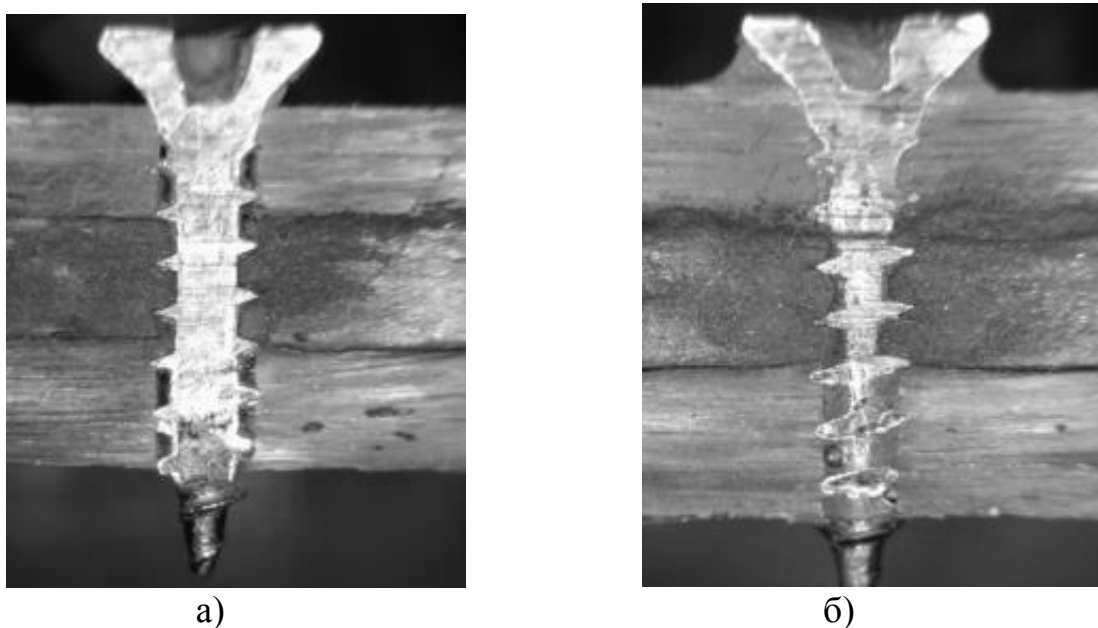


Рисунок 62 – Поперечный разрез образца нахлесточного соединения с армирующим элементом: а) исходный, б) модифицированный

Эффективность предложенного способа подтверждена на примере болтовых соединений в работе [156], в которой отмечается возрастание циклической прочности модифицированных соединений до 4 раз. При этом в работе недостаточно подробно раскрыта методика проведения испытаний и методы

обработки результатов испытаний. Для клеємеханических соединений, армированных самонарезающими винтами, проведены дополнительные исследования (см. подраздел 4.2).

По результатам работы оформлена заявка на изобретение (патент РФ) №2015149272 от 17.11.2015 г. на способ упрочнения клеевых соединений армированных высокопрочными волокнами пластиков и металлов, изготовленных на основе низкомолекулярных клеевых композиций.

#### 4.2 Экспериментальное исследование механического поведения клеємеханических соединений при циклическом нагружении

Объектом исследования является нахлесточное клеємеханическое соединение типа «композит-сталь», рисунок 63.

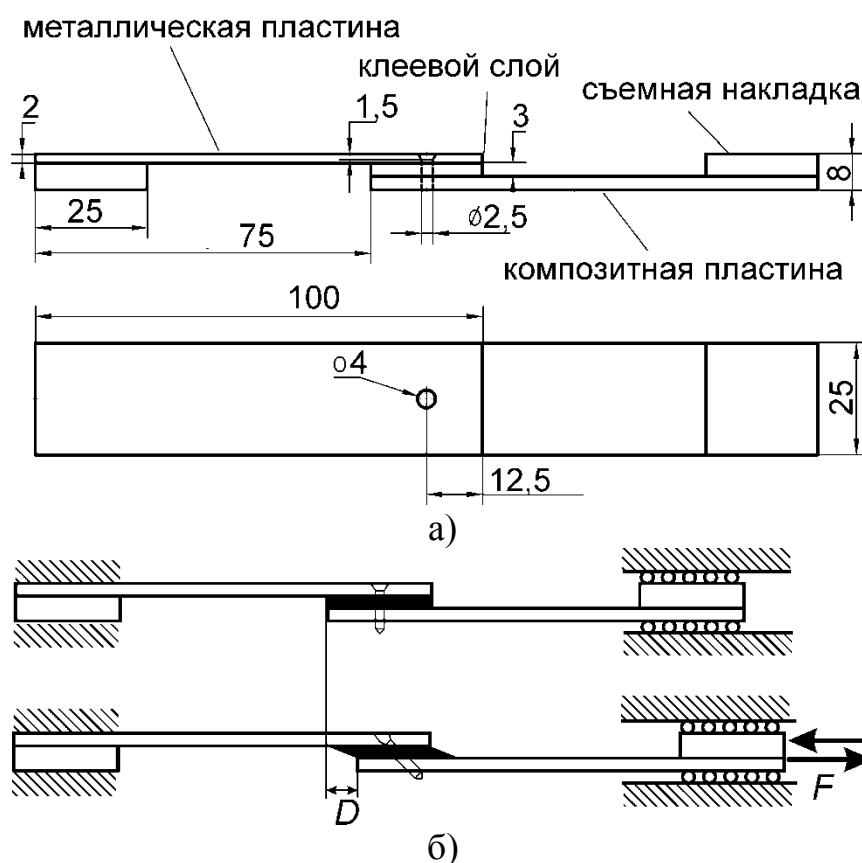


Рисунок 63 – Образец нахлесточного соединения: а) эскиз; б) схема испытаний

Образцы состоят из стальной и стеклопластиковой пластин, соединенных внахлест при помощи полиуретанового герметика марки Terostat 8590 [182]. Зона

нахлёста в центре армирована стальным самонарезающим винтом по DIN 7962 диаметром 2,5 мм [162]. Металлические пластины изготовлены из горячекатаного стального листа по ГОСТ 19903-74 [188] (материал – Сталь 3, толщина 2 мм), стеклопластиковые пластины изготовлены методом контактного формования из хаотически армированного стеклопластика толщиной 3 мм на основе стекломата плотностью 300 г/м<sup>2</sup> и полиэфирной смолы марки Aropol S19 TA с катализатором Butanox M-50 [185]. Отверждение заготовок стеклопластиковых пластин проведено при комнатной температуре в течение 24 часов с последующим постотверждением в сушильном шкафу в течение 4 часов при температуре 70°C.

Перед армированием в образцах были изготовлены сквозные технологические отверстия при помощи высокопрочного сверла диаметром 2 мм (диаметр отверстий подобран из условия неразрушения винтов при вкручивании) с алмазным напылением для металлических изделий со скоростью вращения 3000 об/мин и подачей 0,01 мм/об.

Сверление начинали со стороны композитной пластины, что обеспечило снижение уровня повреждений ХАСП [77] при выходе сверла в слой, состоящий из низко модульного полиуретанового герметика. Проведена также зенковка отверстий со стороны стеклопластиковой пластины сверлом диаметром 4 мм с углом заточки 120° на глубину 1,5 мм. Модифицированные образцы отличаются предварительной обработкой полимером технологических отверстий под самонарезающие винты (подраздел 4.2).

Испытания проведены на базе ЦКП «Центр экспериментальной механики» ФГБОУ ВПО «ПНИПУ» на установке для циклических испытаний Instron Electropulse 3000 при температуре 22±2°C и влажности 75-80%. Частота нагружения была ограничена величиной 10 Гц, при которой не наблюдали существенного саморазогрева (повышение температуры на поверхности образца составило не более 1°C), рисунок 64. Поле температур на поверхности образца контролировали при помощи инфракрасной тепловизионной системы FLIR SC7700M в течение всего процесса испытаний.

Симметричный синусоидальный цикл нагружения был задан программой контроллера при трех уровнях амплитуды нагрузки  $F$  (рисунок 63б): 150, 175 и 200 Н. При каждом уровне нагрузки испытано по три образца каждой группы. Величину перемещения пластин  $D$  в зоне нахлеста (рисунок 63б) измеряли при помощи навесного динамического экстензометра марки Instron 2620-601.

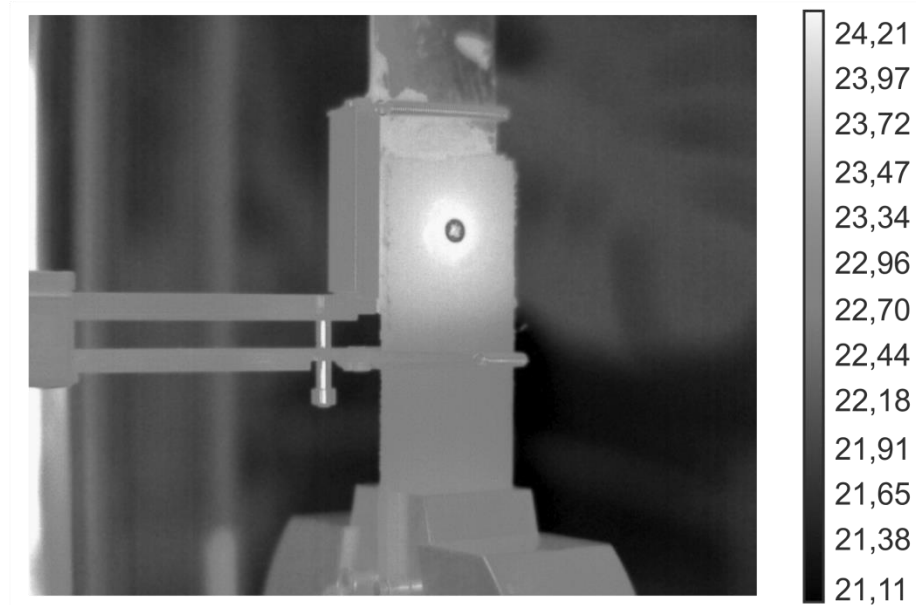


Рисунок 64 – Поле температур на поверхности образца в процессе испытаний (образец исходного типа, амплитуда нагрузки 200 Н)

В ходе испытаний через каждые сто циклов фиксировали циклическую диаграмму «Сила - перемещение» (рисунок 65, см. приложение Б.3), а также вычисляли условную податливость образца по формуле:

$$\delta(N) = \frac{D_{\max}(N) - D_{\min}(N)}{F_{\max}(N) - F_{\min}(N)}, \quad (9)$$

где  $D_{\max}$ ,  $D_{\min}$  – соответственно, максимальное и минимальное перемещения пластин в зоне нахлеста за цикл, м;

$F_{\max}$ ,  $F_{\min}$  – соответственно, максимальное и минимальное значение силы за цикл, Н.



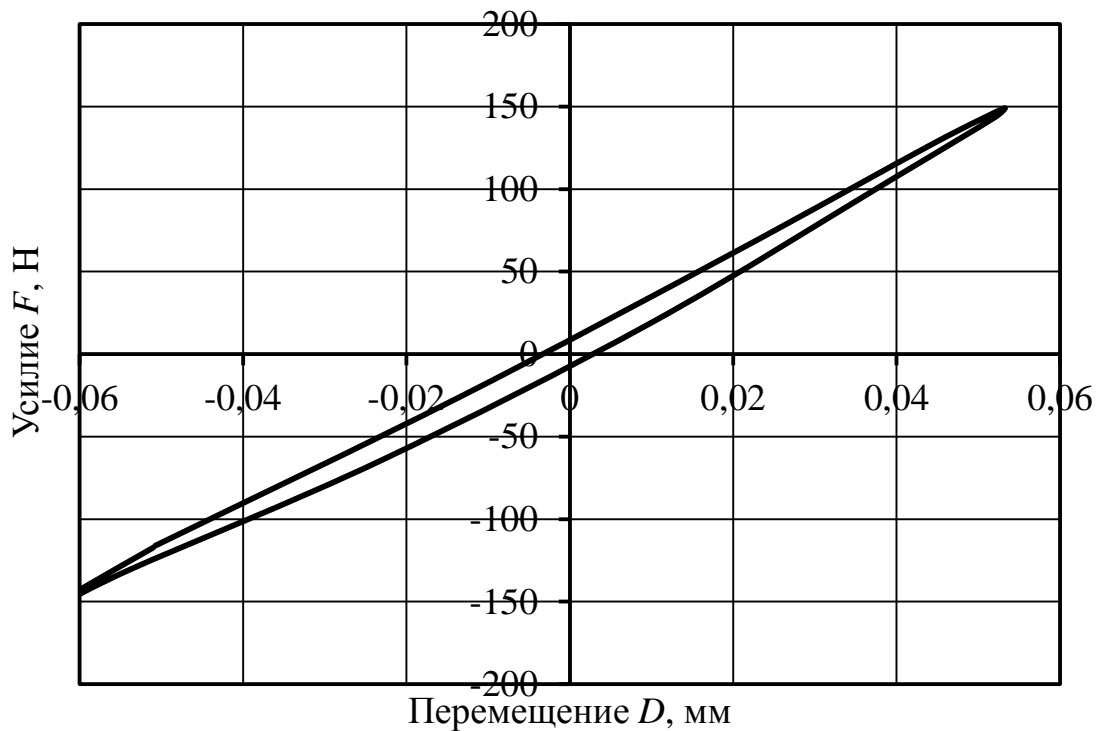


Рисунок 65 – Пример циклической диаграммы «Усилие - перемещение» для образца под нагрузкой  $F = \pm 150\text{Н}$

Для удобства анализа экспериментальных данных, полученных при различных уровнях нагрузки, учитывали относительные величины условной податливости образцов (рисунок 66, приложение Б.3), полученные из выражения:

$$R\delta(N) = \frac{\delta(N) - \delta(0)}{\delta(0)} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где  $\delta(N)$  – текущее значение условной податливости (м/Н);

$\delta(0)$  – начальное значение условной податливости (м/Н).

Как видно из рисунка 66, диаграммы изменения относительной условной податливости (далее – относительной податливости) имеют три характерных участка:

- неустановившееся изменение податливости (начальный участок);
- стационарное изменение податливости;
- лавинообразное увеличение податливости.

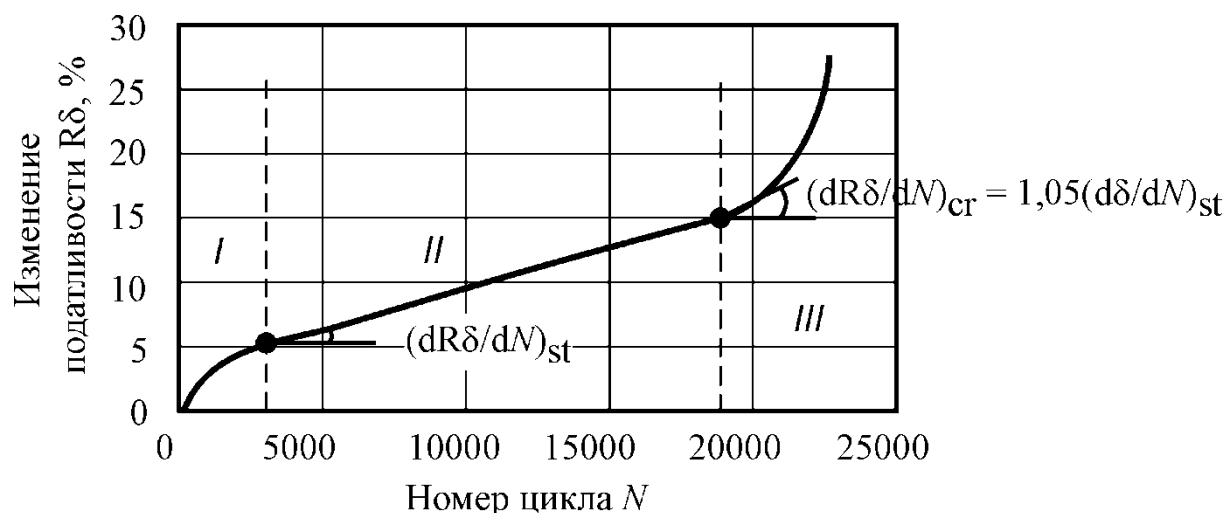


Рисунок 66 – Диаграмма относительного изменения податливости в зависимости от номера цикла

Наличие начального участка, очевидно, связано с «приработкой» образца, характеризуемой выкрашиванием связующего в зоне контакта с самонарезающим винтом.

Далее размах перемещений возрастает до тех пор, пока в работу постепенно не вовлечется стеклопластик без начальных повреждений, при этом скорость развития повреждений в таком стеклопластике стабилизируется и начинается этап стационарного увеличения размаха перемещений винта с соответствующим наклоном экспериментальной диаграммы. Характерные зазоры, образованные в результате выкрашивания стеклопластика, показаны на рисунке 67.

Участок лавинообразного увеличения податливости обусловлен возникновением и развитием трещины в самонарезающем винте, что подтверждается результатами микроскопического исследования поперечных разрезов образцов, находящихся на стадии стационарного и лавинообразного увеличения податливости (рисунок 68).

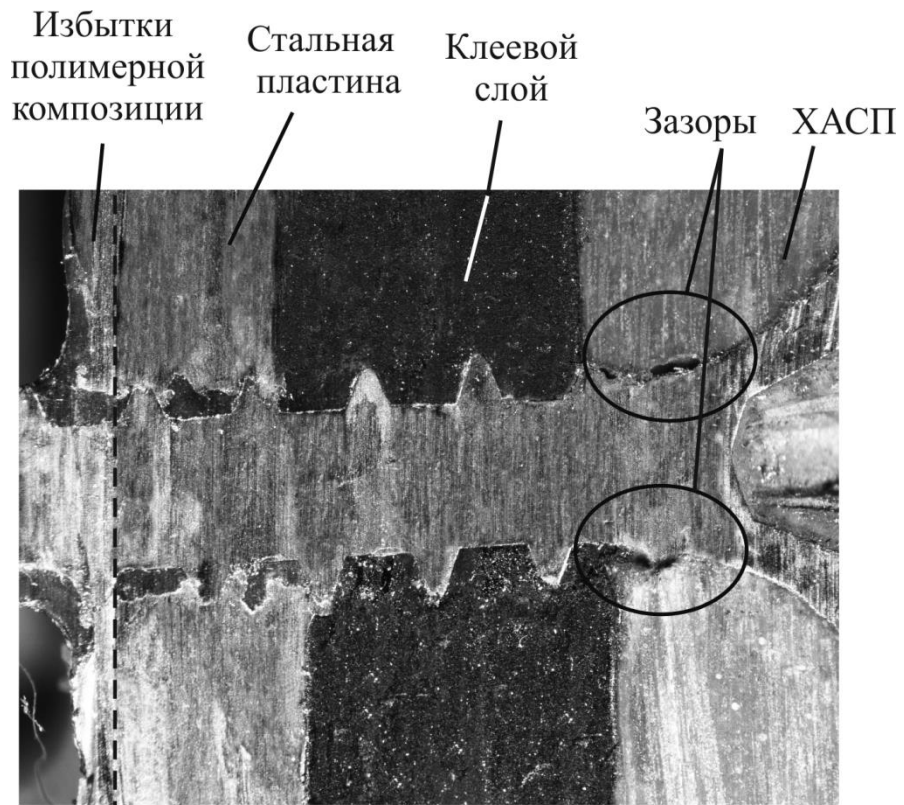


Рисунок 67 – Поперечный разрез модифицированного образца на стадии стационарного увеличения податливости (трещины в винте отсутствуют)

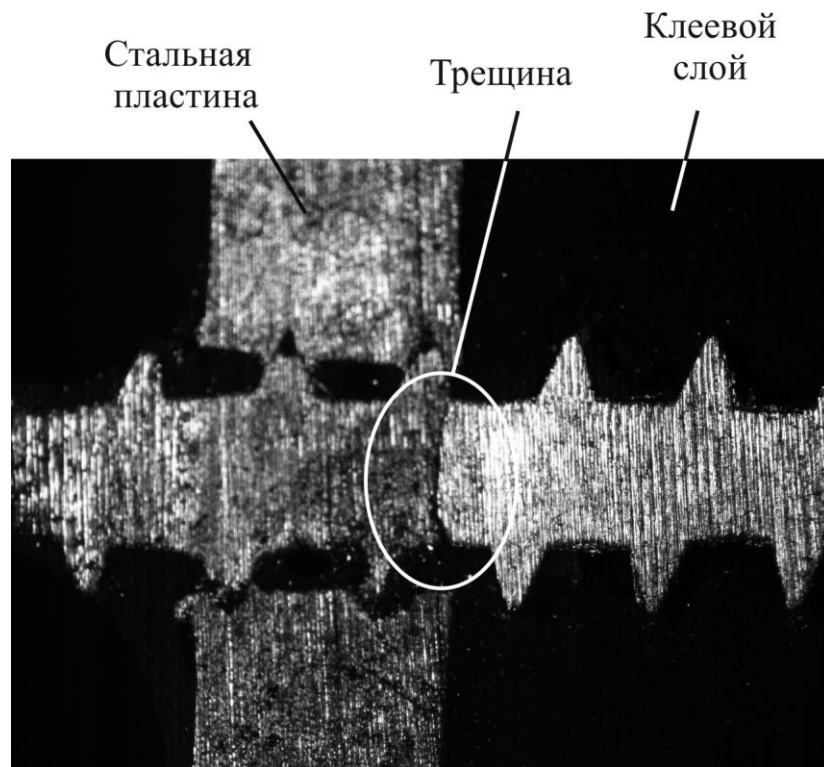


Рисунок 68 – Поперечный разрез модифицированного образца на стадии лавинообразного увеличения податливости

Возникновение и развитие трещины в винте характеризуется увеличением степени асимметрии циклической диаграммы «Сила - перемещение» (рисунок 69), так как образец демонстрирует различную жесткость при раскрытии и закрытии трещины в самонарезающем винте.

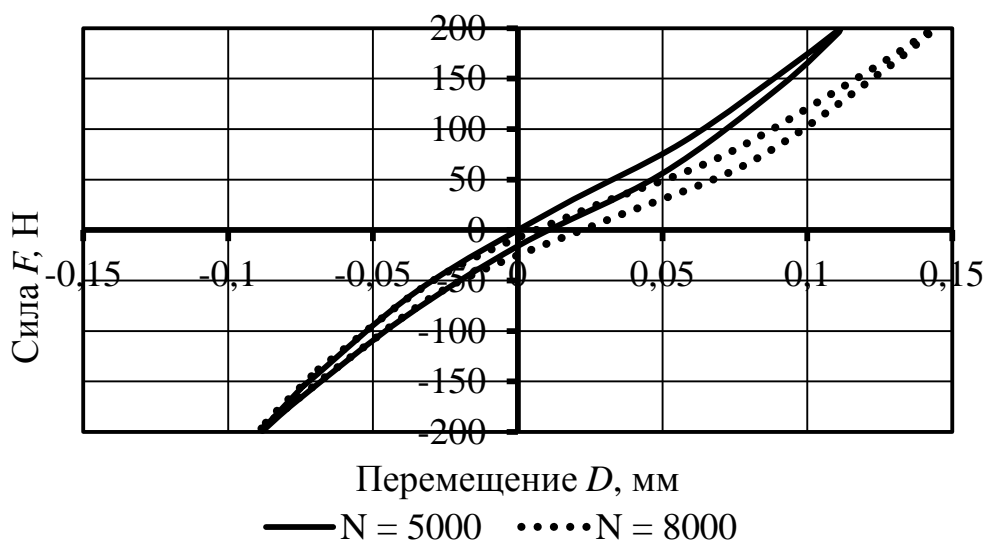


Рисунок 69 – Изменение циклической диаграммы испытания модифицированного образца в результате развития трещины в самонарезающем винте

В качестве предельного состояния образцов принято начало лавинообразного увеличения относительной податливости образцов  $R\delta(N)$ . При этом считается, что после наступления предельного состояния соединение не подлежит дальнейшей эксплуатации, т.к. его податливость начинает неконтролируемо быстро возрастать. Началом лавинообразного роста податливости считали 5% отклонение тангенса угла наклона касательной к диаграмме  $(dR\delta/dN)$  от соответствующего среднего тангенса угла наклона стационарного участка  $(dR\delta/dN)_{st}$  (рисунок 66).

Результаты испытаний после статистической обработки показаны в таблице 12. Все данные получены без учета первых десяти циклов с целью исключения этапа начальной приработки образца, в процессе которой петля гистерезиса стабилизируется.

Определенный разброс результатов испытаний обусловлен отмеченной в главе 3 неоднородностью механических свойств ХАСП и самонарезающих винтов.

Таблица 12 – Результаты циклических испытаний

Тип образца	Амплитуда нагрузки $F$ , Н	Количество циклов до наступления предельного состояния $N_{cr}$			Величина исходной податливости, $1 \cdot 10^{-7}$ м/Н			Величина изменения предельной податливости $\delta_{cr}$ относительно исходной податливости $\delta_0$ , %		
		Среднее	СКО	Коэффициент вариации, %	Среднее	СКО	Коэффициент вариации, %	Среднее	СКО	Коэффициент вариации, %
А*	200	4130	1069	25,9	4,9	0,72	14,6	15,6	1,52	9,8
	175	13800	–	–	4,8	–	–	15,7	–	–
	150	19500	–	–	5,8	–	–	14,0	–	–
Б*	200	2830	1154	40,7	4,9	0,26	–	15	–	–
	175	4000	–	–	6,3	–	–	15	–	–
	150	10500	–	–	5,6	–	–	15	–	–

\*А – модифицированный; Б – исходный

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 гл. 2.

В связи с существенным разбросом механических свойств клеемеханических соединений, в качестве предельного состояния может быть принято не 5%, а 10% отклонение тангенса угла наклона касательной к диаграмме  $dR\delta/dN$ . Анализ показал, что при этом оценка долговечности модифицированных

соединений изменится менее, чем на 3% по нагрузке (пределу выносливости – см. выражение (15)).

Для исходных образцов принятый выше критерий предельного состояния дает оценку в запас по нагрузке, т.к. при примерно том же разбросе начальной податливости, равном  $\pm 15\%$ , податливость исходных образцов в момент старта своего лавинообразного роста может превышать исходные значения вплоть до 27,5%. Для проведения сравнительного анализа, в качестве критерия предельного состояния исходных образцов принято 15% увеличение их податливости относительно начальных значений.

Как видно из результатов испытаний, модифицированные образцы демонстрируют большее количество циклов до наступления предельного состояния во всем исследованном диапазоне нагрузок (от 1,5 до 3,5 раз). При этом коэффициент вариации количества циклов до достижения предельного состояния модифицированных образцов в 1,5 раза ниже, чем для исходных. Указанные положительные эффекты достигаются за счет заполнения полиэфирной композицией зазоров между винтом и стеклопластиком в результате предварительной обработки образцов по методу, описанному выше. Обработка приводит к увеличению площади взаимодействия армирующего самонарезающего винта и стеклопластика, обеспечивая более равномерную передачу нагрузки на армирующий винт и сглаженное поле напряжений, снижая влияние неоднородности механических свойств ХАСП на результаты испытаний.

#### **4.3 Инженерная методика оценки ограниченной долговечности клеемеханических соединений, армированных самонарезающими винтами**

Результаты циклических испытаний модифицированных образцов можно с достаточной точностью аппроксимировать степенной функцией в полулогарифмических координатах. Эта зависимость может быть использована для оценки долговечности путем экстраполяции в область многоцикловых испытаний.

Уравнение, связывающее количество циклов до наступления предельного состояния и величину амплитуды действующей нагрузки, имеет вид (рисунок 70):

$$F = -65,01 \cdot \lg(N) + 435,18. \quad (11)$$

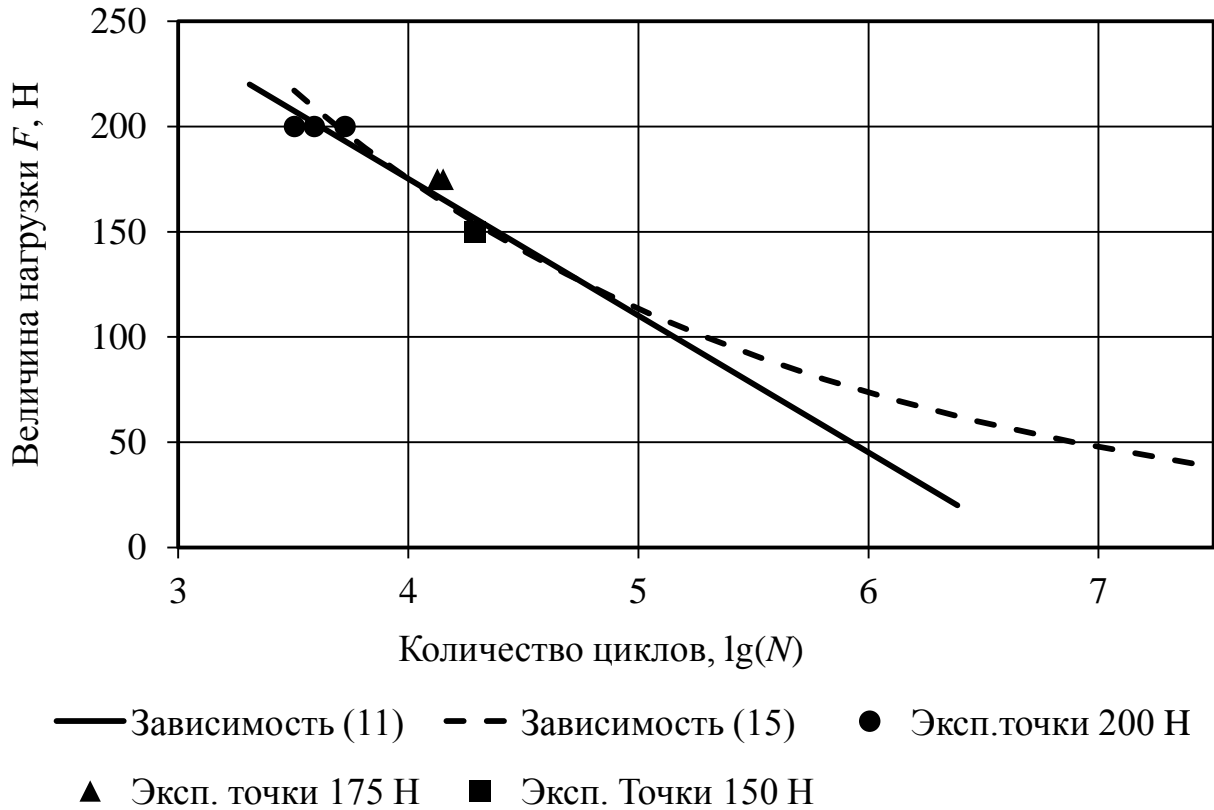


Рисунок 70 – Аппроксимация результатов испытаний модифицированных образцов

Аппроксимация иного вида (степенная), позволяющая рассчитать 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» [184]), получена на основе анализа кинетики изменения условной податливости в зависимости от номера цикла.

Как отмечалось выше, диаграмма относительного изменения условной податливости имеет характерный вид, показанный на рисунке 71.

В предыдущем пункте было показано, что для всего диапазона исследованных нагрузок приращение условной податливости модифицированных

образцов при достижении предельного состояния не зависит от величины нагрузки и составляет в среднем 15% по сравнению с начальным состоянием.

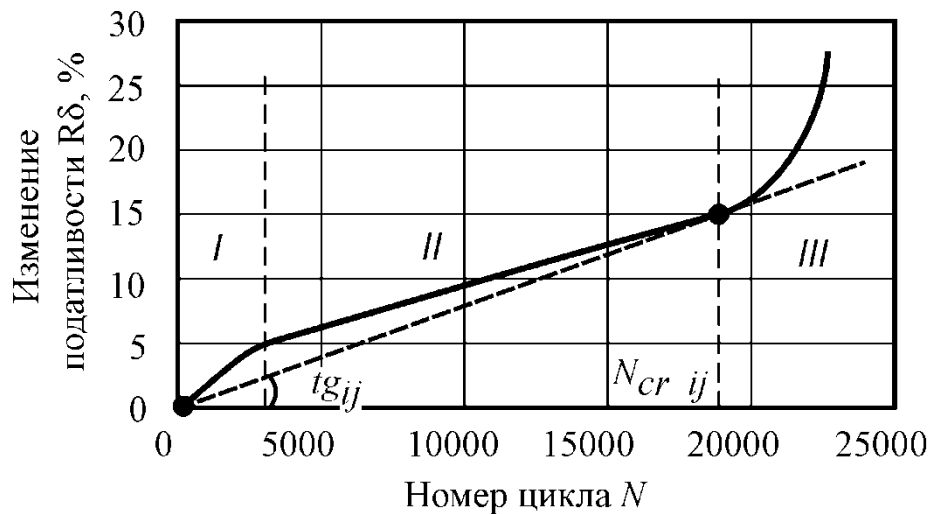


Рисунок 71 – Пример диаграммы относительного изменения условной податливости в процессе испытаний

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

$$\Delta\delta_{cr} = R\delta(N_{cr}) - R\delta(0) = const = 15\% . \quad (12)$$

С использованием данного допущения зависимость «нагрузка - число циклов до наступления предельного состояния» определена при помощи секущих прямых, соединяющих начальное и предельное состояние образцов на диаграмме изменения относительной податливости (рисунок 71). Тангенс угла наклона таких прямых задается выражением:

$$tg_{ij} = \Delta\delta_{cr} / N_{cr\_ij} , \quad (13)$$

где  $N_{cr\_ij}$  – количество циклов до наступления предельного состояния при  $i$ -ой нагрузке для  $j$ -го образца (таблица 12).



На рисунке 72 показаны значения тангенсов угла наклона секущих экспериментальных диаграмм и их аппроксимация с минимальным СКО степенной функцией в зависимости от величины нагрузки.

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 72).

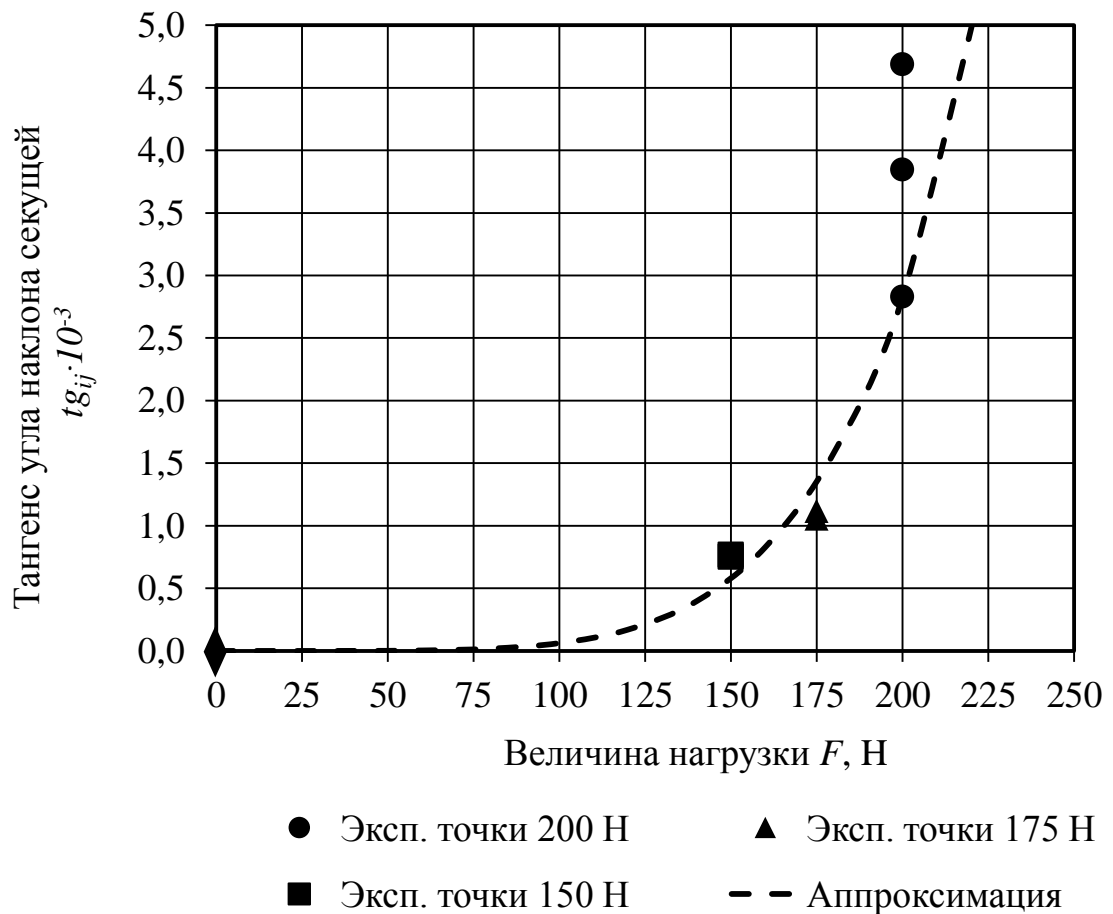


Рисунок 72 – Тангенсы секущих диаграмм изменения относительной податливости образцов и их аппроксимация

Степенная аппроксимация имеет вид:

$$tg(F) = 1,823 \cdot 10^{-15} \cdot F^{5,312}. \quad (14)$$

Выбранная аппроксимация обеспечивает равномерную среднюю относительную погрешность на всем диапазоне экспериментальных данных. Величины средней относительной погрешности показаны в таблице 13.

Таблица 13 – Погрешность степенной аппроксимации циклических испытаний

Величина нагрузки	150	175	200
Модуль средней погрешности относительно экспериментальных точек, %	22	24,9	23,4

Выразив количество циклов до достижения предельного состояния через тангенс угла наклона в уравнении (13) и подставив туда аппроксимацию (14), получим выражение, позволяющее оценить предел ограниченной выносливости исследуемых клеемеханических соединений:

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

Предел ограниченной выносливости на базе  $N = 1 \cdot 10^7$  циклов (по аналогии с оценкой долговечности стального каркаса по [184]), 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. В приложении «В» показана возможность суммирования повреждений для расчета долговечности клеемеханических соединений при переменных нагрузках, которая требует дальнейших исследований.

Полученная зависимость (15) использована в методике проектирования каркасно-панельного кузова с макрогеометрическими отклонениями (расчет клеемеханических соединений композитной обшивки и стального каркаса по критерию усталостной прочности, гл.2). Отметим, что максимальная эксплуатационная нагрузка в критической области трамвайного вагона (см. гл.2), вычисленная согласно представленной методике, составила  $\approx 48$  Н при выбранном шаге армирования  $p = 50$  мм, то есть эксплуатация модифицированного варианта

клеемеханического соединения будет надежной. В приложении В показана возможность применения гипотезы линейного суммирования повреждений для расчета долговечности клеемеханических соединений при переменных нагрузках, которая требует дальнейших исследований.

#### 4.4 Выводы по главе

В главе исследован способ увеличения долговечности клеемеханических соединений, усиленных самонарезающими винтами. Суть метода заключается в заполнении зазоров между самонарезающим винтом и стенкой отверстия полимером – эпоксидной смолой холодного отверждения. Это приводит к залечиванию начальных дефектов и повреждений (микротрещин, расслоений), возникающих в композитном материале после вворачивания самонарезающего винта и увеличению эффективной площади контакта винтов и соединяемых деталей.

Эффективность разработанного метода проверена путем анализа результатов малоцикловых испытаний (от  $1 \cdot 10^3$  до  $2 \cdot 10^4$  циклов) исходных и модифицированных согласно предложенной технологии образцов нахлесточных соединений. При одинаковой величине податливости, соответствующей наступлению предельного состояния, модифицированные образцы демонстрируют более чем в 4 раза большую долговечность и в 1,5 раза меньший разброс результатов испытаний.

По результатам работы оформлена заявка на изобретение (патент РФ) №2015149272 от 17.11.2015 г. на способ упрочнения клеевых соединений армированных высокопрочными волокнами пластиков и металлов, изготовленных на основе низкомодульных клеевых композиций.

Предложен новый инженерный расчетно-аналитический способ оценки *многоцикловой* прочности клеемеханических соединений с самонарезающими винтами с использованием информации о статической прочности и об изменении податливости соединений при проведении лишь *малоцикловых* испытаний. Асимптота (предел выносливости) соотношений, полученных для исследованных образцов клеемеханических соединений, армированных самонарезающими винтами, достигается при амплитуде нагрузки, составляющей  $\approx 50$  Н.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного в рамках диссертационной работы научного исследования получены следующие **основные результаты**:

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 снижение эквивалентных напряжений в основных несущих профилях каркаса на 40%. С учетом степени в уравнении кривой усталости для элементов сварных конструкций из стального проката  $m = 4$  [184] отмеченное снижение напряжений 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 композицией. 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 клеемеханических 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 клеемеханического 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 клеемеханических соединений с самонарезающими винтами с использованием информации о статической прочности и об изменении податливости соединений при проведении лишь малоцикловых испытаний.

Асимптота (предел выносливости) соотношений, полученных для исследованных образцов клеемеханических соединений, армированных самонарезающими винтами, достигается при амплитуде нагрузки, составляющей ~50 Н.

### **Дальнейшее развитие работы**

Разработанные в настоящем исследовании расчетные и экспериментальные методики и математические модели будут 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 ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Wennberg D. Multi-Functional Composite Design Concepts for Rail Vehicle Car Bodies: Doctoral Thesis/ D. Wennberg. – Stockholm, 2013. – 59 p.
2. Chiaberge M. New Trends and Developments in Automotive Industry/ E. Ghassemieh; ed. by M. Chiaberge. – Rijeka: InTech Europe, 2011. – 394 p.
3. Carpenter J.A. Challenges and Opportunities for Automotive Composites/ J.A. Carpenter// Proceedings of SPE Automotive Composites Conference. – 2008. – 16 p.
4. Elmarakbi A. Advanced Composite Materials for Automotive Applications Structural Integrity and Crashworthiness/ ed. by A. Elmarakbi. – Chichester: «John Wiley & Sons», 2014. – 435 p.
5. Vadya U. Composites for Automotive Truck and Mass Transit: Materials, Design, Manufacturing/ U. Vadya. – Lancaster: «DEStech Publications», 2011. – 419 p.
6. Joost W.J. Reducing vehicle weight and improving u.s. energy efficiency using integrated computational materials engineering/ W.J. Joost// JDM. – 2012. – vol. 64, №9. – pp. 1032-1038. DOI: 10.1007/s11837-012-0424-z
7. Киотский протокол к рамочной конвенции ООН об изменении климата: офиц. текст. – Киото, 1998. – 26 с.
8. 2050 Low-Carbon Economy (Climate Action of European Commission) [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: [http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050/documentation\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050/documentation_en.htm)
9. Иванов А.М. Основы конструкции автомобиля/ А.М. Иванов, А.Н. Солнцев, В.В. Гаевский и др. – М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2005. – 336 с.
10. Вахламов В.К. Автомобили: Теория и конструкция автомобиля и двигателя: Учебник для студ. Учреждений сред. Проф. Образования/ В.К. Вахламов, М.Г. Шатров, А.А. Юрчевский. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 816 с.

11. Понтиселли К. Стоимость жизненного цикла железнодорожного подвижного состава: от теории к практике/ К. Понтиселли// Техника железных дорог. – 2009. – №4. – сс. 19-24
12. Мотовилов К.В. Технология производства и ремонта вагонов: учебник для вузовж.-д. трансп./ К.В. Мотоилов, В.С. Лукашук, В.Ф. Криворудченко, А.А. Петров; под ред. К.В. Мотовилова. – М.: Маршрут, 2003. – 382 с.
13. Ксеневиц И.П. Наземные тягово-транспортные системы. В 3 т. Т. 2. Аспекты технико-эргономического и экологического проектирования и конструирования наземных тягово-транспортных систем/ И.П. Ксеневиц, В.А. Гоберман, Л.А. Гоберман. – М.: Машиностроение», 2003. – 878с.
14. Best Practices and Strategies for Improving Rail Energy Efficiency: final report/ Federal Railroad Administration. – Washington, 2014. – 96 p.
15. Евграфов А.Н. Аэродинамика автомобиля: учебное пособие [Текст]/ А. Н. Евграфов. – М.: «МГИУ», 2010. – 356 с.
16. Davies G. Materials for Automobile Bodies/ G. Davies. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. – 416 p.
17. Heuss R. Lightweight, heavy impact/ R. Heuss, N. Muller, W. van Sintern, A. Starke, A. Tschiesner. – McKinsey & Company, 2012. – 24 p.
18. Barbero E.J. Introduction to Composite Materials Design: Second Edition/ E.J. Barbero. – Boca Raton: CRC Press, 2010. – 562 p.
19. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 317 с.
20. Lee W.G. The next generation material for lightweight railway car body structures: magnesium alloys/ W.G. Lee, J.-S. Kim, S.Ju Sun, J.-Y. Lim// Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit. – 2016. – pp.1-18. DOI: 10.1177/0954409716646140
21. Grasso M. Composite material design for rail vehicle innovative lightweight components/ M. Grasso, A. Gallone, A. Genovese, L. Macera, F. Penta, G. Pucillo, S. Strano// Proceedings of the World Congress on Engineering. – 2015. – Vol II. – 6 p.
22. Matsumoto M. New technologies for railway trains/ M. Matsumoto, K. Masai, T. Wajima// Hitachi Review. – 1999, Vol. 48, No. 3. – 134-138

23. Shin K.B. An experimental study of low-velocity impact responses of sandwich panels for Korean low floor bus/ K.B. Shin, Lee J.Y., Cho S.H.// Composite Structures. – 2008. – vol. 84. – pp. 228–240. DOI: doi:10.1016/j.compstruct.2007.08.002

24. Кобелев В.Н. Расчет трехслойных конструкций/ В.Н. Кобелев, Л.М. Коварский, С.И. Тимофеев; под общ. ред. В.Н. Кобелева. – М.: «Машиностроение», 1984. – 300 с.

25. Штамм К. Многослойные конструкции/ К. Штамм, Х. Витте; под. общ. ред. С.С. Кармилова; [пер. с нем. Т.Н. Орешниной]. – М.: «Стройиздат», 1983. – 295 с.

26. Duffy J.E. Auto-body Repair Technology/ E. Duffy. – Boston: «Cengage Learning», 2016. – 1053 p.

27. Кузьмич Л.Д. Вагоны/ Л.Д. Кузьмич, А.В. Кузнецов, Б.А. Ржавинский и др.; под общ. ред. Л.Д. Кузьмича. – М.: «Машиностроение», 1978. – 376

28. Скиба И.Ф. Вагоны/ И.Ф. Скиба. – М.: «ВИПО Министерства путей сообщения», 1961. – 280 с.

29. Кудрявцев С.М. Основы проектирования, производства и материалы кузова современного автомобиля/ С.М. Кудрявцев, Г.В. Пачурин, Д.В. Соловьев, В.А. Власов; под общ. ред. С.М. Кудрявцева. – Нижний Новгород: «НГТУ им. Р.Е. Алексеева», 2010. – 236 с.

30. Автобусные шасси серии Scania (Скания) для туристических и междугородных автобусов [электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: [http://scanauto.ru/catalog-motor-vehicle-scania/bus-scania/mezhdugorodnye\\_turisticheskie\\_avtobusy\\_scania/shassi-scania-turing/shassi-seriya-k2/](http://scanauto.ru/catalog-motor-vehicle-scania/bus-scania/mezhdugorodnye_turisticheskie_avtobusy_scania/shassi-scania-turing/shassi-seriya-k2/)

31. Ma C. Application of comprehensive optimization into bus structure lightweight improvement in 3-section chassis frame/ C. Ma, F. Lan// Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. – 2013. – vol. 8. – pp. 1023-1030



32. de Aguiar, F. Frame structure optimization for bus chassis/ F. de Aguiar, M. Gimenez, A. Pazian, D. Spinelli// SAE Technical Paper. – 2002. – 8 p. DOI: 10.4271/2002-01-3383
33. Boonpuek P. Strength analysis of chassis structure for double deck bus/ p. boonpuek, S. Rooppakhun, S. Siwadamrongpong, S. Bua-Ngam// Advanced Materials Research. – 2013. – vol. 658. – pp. 408-413. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.658.408
34. Reddy S. Rationale behind «stainless steel super structure» for buses/ S. Reddy, T. Shekar// SAE Technical paper. – 2013. – 11 p. DOI: 10.4271/2013-01-2418
35. Orlov L. The analysis of elastic-plastic mechanics of bus body construction in conditions of rollover by means of simulation and real test/ L. Orlov, P. Rogov, A. Tumasov, A. Vashurind// Proc. of International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling. – 2015. – pp. 206-209
36. Liang C.C. Lightweight optimization of bus frame structure considering rollover safety/ C. C. Liang, G. N. Le// WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2012. – vol. 155. – pp. 1185-1196. DOI: 10.2495/SC120992
37. Croccolo D. Structural analysis of an articulated urban bus chassis via fem: a methodology applied to a case study/ D. Croccolo// Journal of Mechanical Engineering. – 2011. – vol. 57. – pp. 799-809. DOI: 0.5545/sv-jme.2011.077
38. Zhong W. Multi-objective topology and sizing optimization of bus body frame / W. Zhong, R. Su, L. Gui, Z. Fan// J. Struct Multidisc Optim. – 2016. – 14 p. DOI: 10.1007/s00158-016-1431-4
39. Qin S.-J Optimization and static strength test of carbody of light rail vehicle/ S.-J. Qin, Y.-Zh. Zhong, X.-Y. Yang, M.-H. Zhao Ming-hui// J. Cent. South Univ. Technol. – cho2008. – vol. 15 (N2). – pp. 288-292. DOI: 10.1007/s11771-008-0473-1
40. Brochure «Inspired by Move: the New Evolution Series products» [электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://www.skoda.cz/en/products/tramcars/forcity/tramcar-26t/Contents.3/0/FBAEE4A91ABE14CC359D5124FBDF98AF/resource.pdf>

41. Brochure «Tram System – Combino Plus Budapest, Hungary» [электронный ресурс]. Режим доступа:

<https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/trams-and-light-rail/combino-plus-budapest-en.pdf>

42. Brochure «Avenio M - Drive on Through Even the Tightest Curves» [электронный ресурс]. Режим доступа:

<https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/en/urban-mobility/rail-solutions/trams-and-light-rail/avenio-m/pages/avenio-m.aspx>

43. Bang Je-S. Light-weight design of maglev car-body frame using response surface approximation/ Je-S. Bang, J.-W. Han, J.-M. Lee// Journal of the Korean Society for Precision Engineering. – 2011. – Vol. 28, No. 11. – pp. 1297-1308.

44. Langan T. High-Strength, Lightweight Car Bodies for High-Speed Rail Vehicles: Final Report for High-Speed Rail IDEA Project 32/ T. Langan, W.M. Buchta. – Baltimore: «Surface Treatment Technologies», 2003. – 24 p.

45. US patent 5383406 Body structure for railway vehicles. – 1995. – 11 p.

46. US patent 5685229 A Railway Car Body Structures and Method of Making Them. – 1997.

47. Lohwasse D. Friction Stir Welding: From Basics to Applications/ D. Lohwasse, Z. Chen. – Cambridge: «Woodhead Publishing», 2009. – 436 p.

48. Песков В.И. Расчетно-экспериментальное сравнение жесткости автобусных кузовов/ В.И. Песков, О.В. Воронков// Наземные транспортные системы – 2013. – pp. 91-97

49. The right stuff [электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <https://www.scania.com/group/en/the-right-stuff/>

50. Testoni O. Concept and Preliminary Design of a Composite Monocoque for an Electric City-Bus: Master Thesis/ O. Testoni. – Zurich, 2015. – 88 p.

51. Вашурин А.С. Расчетно-экспериментальная оценка пассивной безопасности кузовов вахтовых автобусов, выполненных из многослойных сэндвич-панелей/ А.С. Вашурин, А.С. Волков, Д.И. Сизоненко, Л.Н. Орлов//

Материалы 87-й Международной научно-технической конференции «Эксплуатационная безопасность автотранспортных средств». – 2014. – с. 213-218

52. Structural optimization in the design of a composite rail car body [электронный ресурс]. Режим доступа: [www.simtech.fr/pdfS/SIA\\_2014\\_EDP\\_PG\\_final.pdf](http://www.simtech.fr/pdfS/SIA_2014_EDP_PG_final.pdf)

53. Grasso M. Composite material design for rail vehicle innovative lightweight components/ M. Grasso, A. Gallone, A. Genovese, L. Macera, F. Penta, G. Pucillo, S. Strano// Proceedings of the World Congress on Engineering – 2015. – Vol II. – 6 p.

54. Миронов В. Вагоны нового поколения: надежность, комфорт, доступность/ В. Миронов// Журнал партнеров трансмашхолдинг. – 2010. – №2. – с. 4-9

55. Patent EP 0392828 A2 Railway Car Body and Its Method of Manufacture. – 1990

56. US patent 7993719 Assembled structure of a sandwich panel and a connecting member using adhesive attachment. – 2011

57. US patent 7000978 B1 Thin-skin ultralight recreational vehicle body system. – 2006

58. Brochure «Combino Tram Erfurter Verkehrsbetriebe AG» [электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/trams-and-light-rail/combino-erfurt-en.pdf>

59. Мацак В.А. Расчетные исследования кузовов автобусов из различных материалов/ Мацак В.А., Н.Ф. Бледная// Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2005. – N29. – 4 p.

60. Wennberg D. Light-Weighting Methodology in Rail Vehicle Design through Introduction of Load Carrying Sandwich Panels: Licentiate Thesis/ D. Wennberg. – Stockholm, 2011. – 28 p.

61. Kim J.-S. Manufacturing and structural safety evaluation of a composite train carbody/ J.-S. Kim, S.-J. Lee, K.-B. Shin//Composite Structures. – 2007, No 78. – pp. 468–476. doi:10.1016/j.compstruct.2005.11.006

62. Kim J.-S. Natural frequency evaluation of a composite train carbody with length of 23 m/ Kim J.-S. Jeong J.-Ch.// *Composites Science and Technology*. – 2006. – vol. 66. – pp. 2272–2283. DOI: doi:10.1016/j.compscitech.2005.11.036

63. Heller P. Hybrid body of underground railway car: path towards reduced weight of rail vehicles/ P. Heller, J. Korinek, L. Triska// *MM Science Journal*. – 2015. – pp. 631-634

64. Harte A.M. A multilevel approach to the optimisation of a composite light rail vehicle bodyshell/ A.M. Harte, J.F. McNamara, I.D. Roddy// *Composite Structures*. – 2004. – No 63. – pp. 447–453. doi:10.1016/S0263-8223(03)00193-4

65. Cho J.G. A lightweight design approach for an emu carbody using a material selection method and size optimization/ J.G. Cho, J.S. Koo, H.S. Jung// *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2016. – vol. 30 (N2). – pp. 673-681. DOI: 10.1007/s12206-016-0123-8

66. Ning H. Thermoplastic sandwich structure design and manufacturing for the body panel of mass transit vehicle/ H. Ning, G.M. Janowski, U.K. Vaidya, G. Husman// *Composite Structures*. – 2007. – No 80. – pp. 82–91. DOI:10.1016/j.compstruct.2006.04.090

67. ГОСТ 8645-68 Трубы прямоугольные: сортамент. – М.: «Издательство стандартов», 1993. – 10 с.

68. Papadakis S. Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains: Doctoral Thesis/ S. Papadakis. – Munchen, 2008. – 260 p.

69. Shen Zh. influence of welding sequence on welding deformation and residual stress of a stiffened plate structure/ Z. Chen, Z. Chen, R.A. Shenoi// *Ocean Engineering*. – 2015. – Vol. 106. – pp. 271-280

70. Arriaga I.H. Welding Sequence Analysis: Doctoral Thesis/ I.H. Arriaga. – Krakov, 2009. – 247 p.

71. УРГА.СТОК–00.00.00.00.000 П302 Средства технологического оснащения. Участок контроля и испытаний каркаса модулей (СТОКИМ)

[Пояснительная записка технического проекта]/ В.Б. Федоров, И.А. Щуров, Б.М. Суховилов, Е.А. Гриорова, Е.Н. Горных. – Челябинск: ЮУрГУ, 2015. – 106 с.

72. Ning H. Design, manufacture and analysis of a thermoplastic composite frame structure for mass transit/ H. Ning, U. Vaidya, G. M. Janowski, G. Husman// *Composite Structures*. – 2007. – No 80. – pp. 105–116

73. Попов А. Первый электробус на аккумуляторах "Лиотеха" сделают к концу года [электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.nanonewsnet.ru/blog/nikst/pervyi-elektrobus-na-akkumulyatorakh-liotekha-sdelayut-k-kontsu-goda>

74. Трамвай модели 60102 [электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://www.belarus-export.ru/company/4396/goods/3466/>

75. Фентон Дж. Несущий каркас кузова автомобиля и его расчет/ Дж. Фентон; под. общ. ред. Э.И. Григолюка; [пер. с англ. К.Г. Бромштейн]. – М.: «Машиностроение», 1984. – 200 с.

76. Thoppul Sh.D. Mechanics of mechanically fastened joints in polymer–matrix composite structures – A review/ Sh.D. Thoppul, J. Finega, R.F. Gibson// *Composites Science and Technology*. – 2009. – No. 69. pp. 301–329. DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.09.037

77. Heslehurst R.B. Design and analysis of structural joints with composite materials/ R.B. Heslehurst. – Lancaster: «DEStech Publications», 2013. – 459 p.

78. Puchala K. About mechanical joints design in metal-composite structure/ K. Puchala, E. Szymczyk, J. Jachimowicz// *J. of KONES Powertrain and Transport*. – 2012. – vol. 19, No. 3. – 10 p.

79. Caprino G. Pin-bearing strength of glass mat reinforced plastics/ G. Carpino, G. Giorleo, L. Nele, A. Squillace// *Composites: Part A*. – 2002. – No. 33. – pp. 779-785

80. Atas A. Subcritical damage mechanisms of bolted joints in CFRP composite laminates/ A. Atas, C. Soutis// *Composites: Part B*. – 2013. – No. 54. – pp. 20–27. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.071>

81. Tong L. Analysis and design of structural bonded joints/ L. Tong, G.P. Steven. – Norwell: «Kluwer Academic Publishers», 1999. – 288 p.

82. Paris F.A study of Failure criteria of fibrous composite materials/ F. Paris. – Hampton: :Langley research center, 2001. – 76 p.
83. Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composite/ Z. Hashin// Trans ASME J. Applied Mechanics. -1980. – vol. 47, No 2. – pp. 329–34
84. P.P. Camanho A design methodology for mechanically fastened joints in laminated composite materials/ P.P. Camanho, M. Lambert// Composites Science and Technology. – 2006. – No. 66. – pp. 3004–3020. DOI: doi:10.1016/j.compscitech.2006.02.017
85. Yamada S.E. Analysis of Laminate Strength and Its Distribution/ S.E. Yamada, C.T. Sun// J. Composite Materials. – 1978. – vol. 12, July. – pp. 275-284
86. Aktas A. Experimental and numerical failure analysis of pinned-joints in composite materials/ A. Aktas, H. Imre, Y. Cunedioğlu// Composite Structures. – 2009. – No. 89. – pp. 459–466. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.09.009
87. Tsai S.W. A general theory of strength for anisotropic materials/ S.W. Tsai, E.M. Wu// J. Composite Materials. – 1971. – No. 5. – pp. 58–80
88. Sheppard A. A damage-zone model for the failure analysis of adhesively bonded joints/ A. Sheppard, D.W. Kelly, L. Tong// Int. J. of Adhesion and Adhesive. – 1998. – vol. 18, No 6. – pp. 385-400
89. Carrere N. Comparison between models based on a coupled criterion for the prediction of the failure of adhesively bonded joints/ N. Carrere, E. Martin, D. Leguillon// Engineering Fracture Mechanics. – 2015. – Accepted manuscript. – 29 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.03.004>
90. Pisano A.A. Peak load prediction of multi-pin joints FRP laminates by limit analysis/ A.A. Pisano, P. Fuschi, D. De Domenico// Composite Structures. – 2013. – No. 96. – pp. 763–772. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.038>
91. Whitney J.M. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations/ J.M. Whitney, R.J. Nuismer// J. Composite Materials. – 1974. – No. 8. – pp. 253–65

92. Yan U.M. Response and failure of composite plates with a bolt-filled hole [DOT/FAA/AR-97/85]/ H.T. Sun, W.D. Wei, F.K. Chang. – Washington: Office of Aviation Research, 1998.

93. Atas A. Strength prediction of bolted joints in CFRP composite laminates using cohesive zone elements/ A. Atas, C. Soutis// Composites: Part B. – 2014. – No. 58. – pp. 25–34. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.017>

94. Banea M.D. Adhesively bonded joints in composite materials: an overview/ M.D Banea, L.F.M. da Silva// Proc. IMechE: J. Materials: Design and Applications. – 2009. – Vol. 223, Part L. – pp. 18 p. DOI: 10.1243/14644207JMDA219

95. Abdel Wahab M.M. Fatigue in Adhesively Bonded Joints: A Review/ M.M. Abdel Wahab// ISRN Materials Science. – 2012. – Vol. 2012. – 26 p.

96. Kruse T. Bonding of CFRP primary aerospace structures: overview in the technology status in the context of the certification boundary conditions addressing needs for development/ T. Kruse, T. Körwien, S. Heckner, M. Geistbeck// Proceedings of the 20-th international conference on composite materials (ICCM 20). – 2015, Copenhagen

97. Sarrado C. On the validity of linear elastic fracture mechanics methods to measure the fracture toughness of adhesive joints/ C. Sarrado, A. Turon, J. Costa, J. Renart// Int. J. Solids Structures. – 2016. – No 81. – pp. 110–116

98. Rice J.R. A path independent integral and approximate analysis of strain concentration by notches and cracks/ J.R. Rice// Applied Mechanics. – 1968. – vol. 35, No 2. – pp. 379–386

99. Sarrado C. An experimental analysis of the fracture behavior of composite bonded joints in terms of cohesive laws/ C. Sarrado, A. Turon, J. Costa, J. Renart// Composites: Part A. – 2016. – No 90. – pp 234–242

100. Park K. Cohesive zone models: a critical review of tractionseparation relationships across fracture surfaces/ K. Park, G.Paulino// Appl. Mech. Rev. – 2011. – vol. 64, No 6

101. de Moura M.F.S.F. Fatigue/fracture characterization of composite bonded joints under mode I, mode II and mixed-mode I + II/ M.F.S.F. de Moura, J.P.M. Gonçalves, M.V. Fernandez// *Composite Structures*. 2016. – No 139. – pp. 62–67
102. Neumayer J. An explicit cohesive element combining cohesive failure of the adhesive and delamination failure in composite bonded joints/ J. Neumayer, H. Koerber, R. Hinterhölzl// *Composite Structures*. – 2016. – No 46. – pp. 75–83. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.03.009>
103. Tong L. An assessment of failure criteria to predict the strength of adhesively bonded joints/ *J. of Reinforced Plastics and Composites*. – 1997. – vol. 16, No 8. – pp. 698-713
104. Sheppard A. A damage-zone model for the failure analysis of adhesively bonded joints/ A. Sheppard, D.W. Kelly, L. Tong// *Int. J. of adhesion and Adhesive*. – 1998. – vol. 18, No 6. – pp. 385-400
105. Merkblatt DVS 1618 Elastisches Dickschichtkleben im Schienenfahrzeugbau. – Berlin, 2002
106. Mooney M. A theory of large elastic deformation/ M. Mooney// *J. Journal of Applied Physics*. – 1940. – vol. 11, No 9. – pp. 582-592.
107. Gültekin K. The Effects of Graphene Nanostructure Reinforcement on the Adhesive Method and the Graphene Reinforcement Ratio on the Failure Load in Adhesively Bonded Joints/ K. Gültekin, S. Akpınar, A. Gürses, Z. Eroglu, S. Cam, H. Akbulut, Z. Keskin, A. Ozel// *Composites Part B*. – 2016. – Accepted Manuscript. – 16 p. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.05.039
108. Sadigh M.A.S. Investigating the effects of reduced graphene oxide additive on the tensile strength of adhesively bonded joints at different extension rates/ M.A.S. Sadigh, G. Marami// *Materials and Design*. – 2016. – No 92. – pp. 36–43
109. Ranta D. Toughened epoxy adhesive modified with acrylate based liquid rubber/ D. Ranta, A.K Banthia// *J. Polym. Int.* – 2000. – No 49. – pp. 281–287.
110. Kinloch A.J The effect of silica nanoparticles and rubber particles on the toughness of multiphase thermosetting epoxy polymers/ A.J. Kinloch, R.D.



Mohammed, A.C. Taylor// J. Material Science Letters. – 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-005-7261-1>.

111. Löbel T. A hybrid bondline concept for bonded composite joints/ T.Löbel, D. Holzhüter, M.Sinapius, C.Hühne// International Journal of Adhesion & Adhesives. – 2016. – No 68. – pp. 229–238. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.03.025>

112. Tserpes K.I. Crack stopping in composite adhesively bonded joints through corrugation/ K.I. Tserpes, G. Peikert, I.S. Floros// Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2015. – Accepted Manuscript. – 16 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tafmec.2015.10.003>

113. Вильнав Ж.-Ж. Клеевые соединения/ Ж.-Ж. Вильнав; под. общ. ред. Г.В. Малышевой; [пер. с фр. Л.В. Синегубовой]. – М.: Техносфера, 2007. – 381 с.

114. Baldan A. Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: adhesives, adhesion theories and surface pretreatment/ A. Baldan// J. Material Science. – 2004. – vol. 39, No 1. – pp. 1–49

115. Kim J.-S. Practical design of tapered composite structures using the manufacturing cost concept/ J.-S. Kim , C.G. Kim, C.S. Hong// Composite Structures. – 2001. – vol. 51, No 3. – pp. 285–299

116. Lang, T. and The effect of recessing on the stresses in adhesively bonded single-lap joints/ K. Lang , K. Mallick// Int. J. Adhesion Adhesives. – 1999. – vol. 19, No 4. – pp. 257–271

117. Lang T. Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints/ T. Lang, K. Mallick//. Int. J. Adhesion Adhesives. – 1998. – vol. 18, No 3. – pp. 167–177

118. da Silva, L. F. M. Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherents and dual adhesives/ L.F M. da Silva, R.D.Adams// Int. J. Adhesion and Adhesives. – 2007. – vol. 27, No 3. – pp. 216–226.

119. Fitton M.D. and Variable modulus adhesives: an approach to optimised joint performance/ M.D. Fitton, J.G. Broughton// Int. J. Adhesion and Adhesives. – 2005. – vol. 25, No 4. – pp. 329–336

120. Chowdhury N.M. Experimental and finite element studies of bolted, bonded and hybrid step lap joints of thick carbon fibre/epoxy panels used in aircraft structures/ N.M. Chowdhury, W.K. Chiu, J.W., P. Chang// *Composites Part B*. – 2016. – No. 100. – pp. 68-77. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.061>

121. Hai N.D. Structural behavior of double-lap joints of steel splice plates bolted/bonded to pultruded hybrid CFRP/GFRP laminates/ N.D. Hai, H. Mutsuyoshi// *Construction and Building Materials*. – 2012. – No. 30. – pp. 347–359. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2011.12.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.001)

122. Fu M. Fatigue of hybrid (adhesive/bolted) joints in SRIM composites/ M. Fu, P.K. Mallick// *Int. J. of Adhesion & Adhesives*. – 2001. – No. 21. – pp. 145-159.

123. Beylergil B. Experimental and numerical analysis of single lap composite joints with inter-adherend fibers/ B. Beylergil, Y. Cunedioğlu, A. Aktas// *Composites: Part B*. – 2011. – No. 42. – pp. 1885–1896. DOI: [doi:10.1016/j.compositesb.2011.06.010](http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.06.010)

124. Park Y.-B. The strength of composite bonded T-joints transversely reinforced by carbon pins/ Y.-B. Park, B.-H. Lee, J.-H. Kweon, J.-Ho Choi, Ik-H. Choi// *Composite Structures*. – 2012. – No. 94. – pp. 625–634. DOI: [10.1016/j.compstruct.2011.08.026](http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.08.026)

125. Nanayakkara A.M. Improving the fracture resistance of sandwich composite T-joints by z-pinning/ A.M. Nanayakkara, S. Feih, A.P. Mouritz// *Composite Structures*. – 2013. – No. 96. – pp. 207–215. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.029>

126. Esmaeili F. Fatigue life estimation of double lap simple bolted and hybrid (bolted/bonded) joints using several multiaxial fatigue criteria/ F. Esmaeili, M. Zehsaz, T.N. Chakherlou, S. Barzegar// *Materials and Design*. – 2015. – No. 67. – pp. 583–595. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.11.003>

127. Esmaeili F. Investigation the effect of tightening torque on the fatigue strength of double lap simple bolted and hybrid (bolted–bonded) joints using volumetric method/ F. Esmaeili, M. Zehsaz, T.N. Chakherlou// *Materials and Design*. – 2014. – No. 63. – pp. 349–359. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.021>

128. Rugg K.L. Mixed mode delamination of polymer composite laminates reinforced through the thickness by Z-fibers/ K.L. Rugg, B.N. Cox, R. Massabo// Composites. – 2004. – vol. 33, No. 2. – pp. 177–190
129. P. Chang Properties and failure mechanisms of pinned composite lap joints in monotonic and cyclic tension/ P. Chang, A.P. Mouritz, B.N. Cox// Composites Science and Technology. – 2006. – No. 66. – pp. 2163–2176. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.11.039
130. Chowdhury N.M. Static and fatigue testing thin riveted, bonded and hybrid carbon fiber double lap joints used in aircraft structures/ N. Chowdhury, W.K. Chiu, J. Wangb, P. Chang// Composite Structures. 2015. – No. 121. – pp. 315–323. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.11.004>
131. Sadowski T. Hybrid Adhesive Bonded and Riveted Joints – Influence of Rivet Geometrical Layout on Strength of Joints/ T. Sadowski, E. Zarzeka-Raczkowska// Archives of Metallurgy and Materials. – 2012. – January. – pp. 1127–1135. DOI: 10.2478/v10172-012-0126-0
132. Kelly G. Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints/ G. Kelly// Composite Structures. – 2006. – No. 72. – pp. 119–129. DOI: 10.1016/j.compstruct.2004.11.002
133. Koh T.M. Experimental determination of the structural properties mechanisms of z-pinned composite T-joints/ T.M. Koh, S. Feih, A.P. Mouritz// Composite Structures. – 2011. – No. 93. – pp. 2222–2230
134. Ko M.-G. Fatigue characteristics of jagged pin-reinforced composite single-lap joints in hygrothermal environments/ M.-G. Ko, J.-H. Kweon, J.-Ho Choi// Composite Structures. – 2015. – No. 119. – pp. 59–66. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.08.025>
135. Hun J. Fatigue characteristics of stainless steel pin-reinforced composite hat joints/ H. Ji, J.-H. Kweon, J.-Ho Choi// Composite Structures. – 2014. – No. 108. – pp. 49–56. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.08.040>
136. Son H.G. Fatigue behavior of metal pin-reinforced composite single-lap joints in a hygrothermal environment/ H.-Gi Son, Y.-B. Park, J.-H. Kweon, J.-Ho Choi//

Composite Structures. – 2014. – No. 108. – pp. 151–160. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.09.012>

137. Bodjona K. Load sharing in single-lap bonded/bolted composite joints. Part I: Model development and validation/ K. Bodjona, K. Raju, G.-H. Lim, L. Lessard// Composite Structures. – 2015. – No. 129. – pp. 268–275. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.04.040>

138. Kelly G. Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints/ G. Kelly// Composite Structures. – 2005. – No. 69, pp. 35–43

139. Raju K.P. Improving load sharing in hybrid bonded/bolted composite joints using an interference-fit bolt/ K. P. Raju, K. Bodjona, G.-H. Lim, Larry Lessard// Composite Structures. – 2016. – Accepted Manuscript. – 22 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.04.025>

140. Bois C. An analytical model for the strength prediction of hybrid (bolted/bonded) composite joints/ C. Bois, H. Wagnier, J.-C. Wahl, E. Le Goff// Composite Structures. – 2013. – No. 97. – pp. 252–260. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.10.022>

141. Barut A. Analysis of bolted–bonded composite single-lap joints under combined in-plane and transverse loading/ A. Barut, E. Madenci// Composite Structures. – 2009. – No. 88. – pp. 579–594. DOI: [10.1016/j.compstruct.2008.06.003](http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.06.003)

142. Oinonen A. Shear damage simulation of adhesive reinforced bolted lap-connection interfaces/ A. Oinonen, G. Marquis// Engineering Fracture Mechanics. – 2013. – No. 109. – pp. 341–352

143. Hoang-Ngoc C.T. Simulation of single-lap bonded and hybrid (bolted/bonded) joints with flexible adhesive/ C.-T. Noang-Ngoc, E. Paroissien// Int. J. Adhesion and Adhesives. – 2010. – vol. 3, No. 3. – pp. 117–129. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2009.12.002>

144. Bianchi F. Finite element modelling of z-pinned composite T-joints/ F. Bianchi, T.M. Koh, X. Zhang, I.K. Partridge, A.P. Mouritz// Composites Science and Technology. – 2012. – No. 73. – pp. 48–56. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.09.008>

145. Dantuluri V. Cohesive modeling of delamination in Z-pin reinforced composite laminates/ V. Dantuluri, S. Maiti, P.H. Geubelle, R. Patel, H. Kilic// *Composites Science and Technology*. – 2004. – No. 67. – pp. 616–631. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.07.024
146. Grassi M. Simulation of pin-reinforced single-lap composite joints/ M. Grassi, B. Cox, X. Zhang// *Composites Science and Technology*. – 2006. – No. 66. – pp. 1623–1638. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.11.013
147. Heimbs S. Failure behaviour of composite T-joints with novel metallic arrow-pin reinforcement/ S. Heimbs, A.C. Nogueira, E. Hombergsmeier, M. May, J. Wolfrum// *Composite Structures*. – 2014. – No. 110. – pp. 16–28. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.11.022>
148. Nakayama M. Design-oriented strength of mechanical joints in composite laminate structures and reliability-based design factor/ M. Nakayama, N. Uda, K. Ono, Sh. Takeda, T. Morimoto// *Composite Structures*. – 2015. – No. 132. – pp. 1–11
149. Egan B. Modelling bearing failure in countersunk composite joints under quasi-static loading using 3D explicit finite element analysis/ B. Egan, M.A. McCarthy, R.M. Frizzell, P.J. Gray, C.T. McCarthy// *Composite Structures*. – 2014. – No. 108. – pp. 963–977
150. Camanho P.P. Increasing the efficiency of composite single-shear lap joints using bonded inserts/ P.P. Camanho, C.M.L. Tavares, R. de Oliveira, A.T. Marquesa, A.J.M. Ferreira// *Composites: Part B*. – 2005. – No. 36. – pp. 372–383
151. Löbel T. Enhanced tensile strength of composite joints by using staple-like pins: working principles and experimental validation/ T. Löbel, B. Kolesnikov, S. Scheffler, A. Stahl, C. Hühne// *Composite Structures*. – 2006. – No. 106. – pp. 453–460. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.06.020](http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.06.020)
152. СНиП II-25-80 Деревянные конструкции. – М.: Минрегион России, 2010. – 92 с.
153. Иванов В.Ф. Деревянные конструкции/ В.Ф. Иванов. – Л.: Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1956. – 319 с.

154. Mossalam A.S. Design guide for FRP composite connections/ A.S. Mossalam. – Reston: American Society of Civil Engineers, 2011
155. Hollaway L.C. Polymers and polymer composites in construction/ L.C. Hollaway. – London: «T. Telford», 1990. – 275 p.
156. Vermel V.D. Nano-modified Adhesive Composition for Aeronautical Structures based on Polymer Composite Materials/ Vermel V.D., Titov S.A., Kornev Ю.В., Nikitina E.A., Boiko O.V.// Indian Journal of Science and Technology. – 2015. – Vol. 8(S10). – pp. 1-9. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8iS10/84885
157. DIN 18182 Accessories for use with gypsum plasterboards - Part 2: Dry wall screws, staples and nails. – German National Standard, 2010. – 14 p.
158. ISO 7050:2011 Cross-recessed countersunk (flat) head tapping screws. – International Standard, 2011. – 8 p.
159. DIN 7981 Cross recesses for screws. – German National Standard, 1990. – 2 p.
160. ГОСТ Р ИСО 7050 Винты самонарезающие с потайной головкой и крестообразным шлицем. Технические условия. – М.: «Госстандарт России», 1993. – 6 с.
161. ГОСТ Р ИСО 1478-93 Резьба самонарезающих винтов. – М.: «Госстандарт России», 1995. – 7 с.
162. DIN 7962 Cross recesses for screws. – German National Standard, 1984.
163. ГОСТ Р ИСО 2702-2009 Виты самонарезающие стальные термообработанные: механические свойства. – М.: «Стандартинформ», 2010. – 5 с.
164. ГОСТ Р ИСО 3506-4-2009 Механические свойства крепежных изделий из коррозионно-стойкой нержавеющей стали. Часть 4: самонарезающие винты. – М.: «Стандартинформ», 2010. – 20 с.
165. Трощенко В.Т. Деформационные кривые усталости сталей и методы определения их параметров. Сообщение 1. Традиционные методы/ В.Т. Трощенко, Л.А. Хамаза// Проблемы прочности. – 2010. - №6. – с. 26-43

166. Basan R. Some considerations on the evaluation of methods for the estimation of fatigue parameters from monotonic properties/ R. Basan, D. Rubeša, M. Franulovića, T. Marohnić// *Procedia Engineering*. – 2015. – No. 101. – pp. 18 – 25. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.02.004
167. Manson S.S. Fatigue: a complex subject – some simple approximation/ S.S Manson// *Exp. Mech.* – 1965. – No. 5. – pp. 193 – 226
168. Mitchell M.R. Fundamentals of modern fatigue analysis/ M.R. Mitchell, D.F. Socie, E.M. Caulfield // *Fracture Control Program Report No. 26*. – University of Illinois (USA), 1977. – pp. 385 – 410.
169. Roessle M.L. Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations/ M.L. Roessle, A. Fatemi A.// *Ibid.* – 2000. – No. 22. – pp. 495 – 511
170. Meggiolaro M.A. Statistical evaluation of strain-life fatigue crack initiation predictions/ M.A. Meggiolaro, Castro J.T.P.// *Ibid.* – 2004. – No. 26. – pp. 463 – 476
171. Трощенко В.Т. Деформационные кривые усталости сталей и методы определения их параметров. Сообщение 2. Методы, основанные на использовании искусственных нейронных сетей/ В.Т. Трощенко, Л.А. Хамаза, В.А. Впостолук, Ю.Н. Бабич// *Проблемы прочности*. – 2011. - №1. – с. 5-26
172. Абызов А.А. Расчет ресурса деталей при случайном независимом многопараметрическом нагружении/ А.А. Абызов, И.Я. Березин, О.С. Садаков// *Вестник ЮУрГУ. Серия: «Машиностроение»*. – 2006. – №11. – с. 30-35
173. Jiang Y. Fatigue life predictions by integrating EVICD fatigue damage model and an advanced cyclic plasticity theory/ Y. Jiang, W. Ott, Ch. Baum, M. Vormwald, H. Nowack// *Int. J. Plasticity*. – 2009. – No. 25. – pp. 780–801. DOI: 10.1016/j.ijplas.2008.06.007
174. ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М.: «ИПК Издательство стандартов», 2004. – 57 с.

175. ASTM 5229 Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials. – Subcommittee: D30.04, 2004. – 13 p.

176. Counts W.A. Temperature effects on ultimate bearing strength of polymeric composite joints/ W.A. Counts, W.S. Johnson// J. Comp. Tech. Res. – 2002. – vol. 24, No. 1. – pp. 17–23

177. Hurd S. Hydrothermal effects on the bearing strength of GFRP composite joint/ S. Hurd, R. Yuan// Materials for the New Millennium, Proceedings of the Fourth Materials Engineering Conference. – 1996. – pp. 243–50

178. Turvey G.J. Failure of pultruded GRP single-bolt tension joints under hot-wet conditions/ G.J. Turvey, P. Wang// Composite Structures. – 2007. – vol. 77, No. 4. – pp. 514–20

179. Fernandes F. Effect of moisture on pure mode I and II fracture behavior of composite bonded joints/ R.L. Fernandes, M.F.S.F. de Moura, R.D.F.// International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2016. – Accepted manuscript. – 24 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.01.010>

180. Park Y.B. Strength of carbon/epoxy composite single-lap bonded joints in various environmental conditions/ Y.-B. Park, M.-G. Song, J.-J. Kim, J.-H. Kweon, J.-H. Choi// Composite Structures. – 2010. – No 92. – pp. 2173–2180

181. Son H-G Fatigue behavior of metal pin-reinforced composite single-lap joints in a hygrothermal environment/ H.-Gi Son, Y.-B. Park, J.-H. Kweon, J.-Ho Choi// Composite Structures. – 2014. – No. 108. – pp. 151–160

182. TEROSTAT 8590: Datasheet [электронный ресурс]. – 2003. – Режим доступа: [http://www.hillmann-geitz.de/media/catalog/product/Dateien/101634471\\_TDB\\_Terostat\\_8590\\_schwarz\\_\\_600ml.pdf](http://www.hillmann-geitz.de/media/catalog/product/Dateien/101634471_TDB_Terostat_8590_schwarz__600ml.pdf)

183. Divinycell P Datasheet [электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://www.diabgroup.com/Products-and-services/Core-Material/Divinycell-P>

184. Нормы для расчета и проектирования механической части новых вагонов трамвая колеи 1524 мм. – М.: ВНИИВ, 1989. – 100 с.



185. Butanox M-50. Техническое описание продукта [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: [http://www.pcpds.akzonobel.com/PolymerChemicalsPDS/showPDF.aspx?pds\\_id=623Eanguard](http://www.pcpds.akzonobel.com/PolymerChemicalsPDS/showPDF.aspx?pds_id=623Eanguard)

186. ГОСТ 25.601-80 Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – М., 1981. – 9 с.

187. ГОСТ 25.602-80 Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – М., 1981. – 13 с.

188. ГОСТ 19903-74 Прокат листовой горячекатаный. Сортамент. – М., 1988. – 17 с.

189. ISO 15977:2002 Open end blind rivets with break pull mandrel and protruding head – Al/St. – International standard, 2013. – 6 p.

190. Сапожников С.Б. Неоднородность локальной жесткости и прочности композита на основе стекломата/ Сапожников С.Б., Безмельницын А.В.//Вестник Пермского Национального исследовательского политехнического университета. Серия «Механика». – 2012, №2.– с. 167-176.

191. Sapozhnikov S.B. The strength of fiber reinforced polymer under a complex loading/ Sapozhnikov S.B., Cheremnykh S.I. // Journal of Composite Materials, 47(20–21) 2013, pp. 2525–2552

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Описание конечно-элементных моделей в пакете ANSYS

### А.1 Конечно-элементная модель кузова низкопольного трамвайного вагона

Material				
	Divinycell	<input type="checkbox"/>		
	GFRP	<input type="checkbox"/>		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
	GFRP_eqv	<input type="checkbox"/>		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
	Glass_eqv	<input type="checkbox"/>		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
	Glass_eqv extra	<input type="checkbox"/>		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
	Glue	<input type="checkbox"/>		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
	Plywood	<input type="checkbox"/>		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
	Shkvor beams	<input type="checkbox"/>		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
	Structural Steel	<input type="checkbox"/>		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

Properties of Outline Row 3: Divinycell					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	110	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Derive from	Shear Modulus and Poisson'...			
5	Young's Modulus	8,046E+07	Pa		<input type="checkbox"/>
6	Poisson's Ratio	0,49			<input type="checkbox"/>
7	Bulk Modulus	1,341E+09	Pa		<input type="checkbox"/>
8	Shear Modulus	2,7E+07	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Field Variables				

Properties of Outline Row 4: GFRP					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	2100	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Derive from	Young's Modulus and Poisso...			
5	Young's Modulus	1,3E+10	Pa		<input type="checkbox"/>
6	Poisson's Ratio	0,23			<input type="checkbox"/>
7	Bulk Modulus	8,0247E+09	Pa		<input type="checkbox"/>
8	Shear Modulus	5,2846E+09	Pa		<input type="checkbox"/>
9	Field Variables				

Properties of Outline Row 5: GFRP_eqv					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	2100	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Derive from	Young's Modulus and Poisso...			
5	Young's Modulus	3E+09	Pa		<input type="checkbox"/>
6	Poisson's Ratio	0,3			<input type="checkbox"/>
7	Bulk Modulus	2,5E+09	Pa		<input type="checkbox"/>
8	Shear Modulus	1,1538E+09	Pa		<input type="checkbox"/>
9	Field Variables				

Divinycell – материал заполнителя сэндвич-панели

GFRP– материал обшивки сэндвич-панели;

GFRP\_eqv – материал эквивалентной по жесткости обшивки кузова.

Рисунок А.1 – Свойства материалов модели кузова трамвайного вагона, часть 1

Properties of Outline Row 6: Glass_eqv				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	2500	kg m <sup>-3</sup>	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Modulus and Poisso...		
5	Young's Modulus	5E+08	Pa	
6	Poisson's Ratio	0,3		
7	Bulk Modulus	4,1667E+08	Pa	
8	Shear Modulus	1,9231E+08	Pa	
9	Field Variables			

Properties of Outline Row 8: Glue				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	1250	kg m <sup>-3</sup>	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Modulus and Poisso...		
5	Young's Modulus	4E+06	Pa	
6	Poisson's Ratio	0,49		
7	Bulk Modulus	6,6667E+07	Pa	
8	Shear Modulus	1,3423E+06	Pa	
9	Field Variables			

Properties of Outline Row 9: Plywood				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	650	kg m <sup>-3</sup>	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Modulus and Poisso...		
5	Young's Modulus	4E+09	Pa	
6	Poisson's Ratio	0,3		
7	Bulk Modulus	3,3333E+09	Pa	
8	Shear Modulus	1,5385E+09	Pa	
9	Field Variables			

Properties of Outline Row 10: Shkvor beams				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	0,001	kg m <sup>-3</sup>	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Modulus and Poisso...		
5	Young's Modulus	2,1E+11	Pa	
6	Poisson's Ratio	0,3		
7	Bulk Modulus	1,75E+11	Pa	
8	Shear Modulus	8,0769E+10	Pa	
9	Field Variables			

Properties of Outline Row 11: Structural Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Modulus and Poisso...		
5	Young's Modulus	2E+11	Pa	
6	Poisson's Ratio	0,3		
7	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
8	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
9	Field Variables			

Glass\_eqv – материал эквивалентной по жёсткости стеклопакет оконного проема с толщиной клеевого шва  $h_1$  (для моделирования перепада толщины клеевого шва);

Glue – материал клеевого шва;

Glass\_eqv extra – материал эквивалентной по жёсткости стеклопакет оконного проема с толщиной клеевого шва  $h_2$ ;

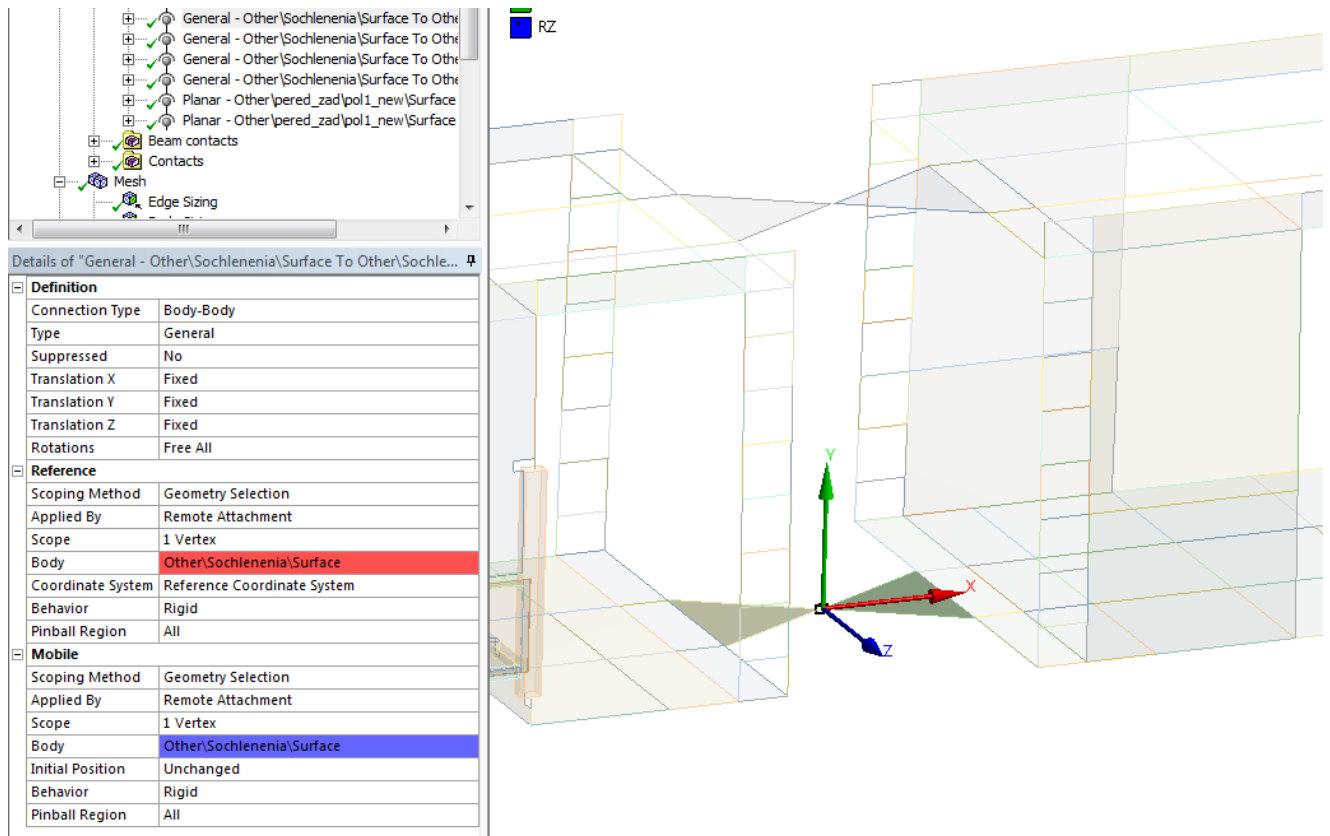
Plywood – материал фанерной обшивки пола вагона;

Glue – материал клеевого шва;

Shkvor beams – материал тележных шкворневых балок, на которые опирается вагон;

Structural steel – материал профилей стального каркаса.

Рисунок А.2 – Свойства материалов модели кузова трамвайного вагона, часть 2

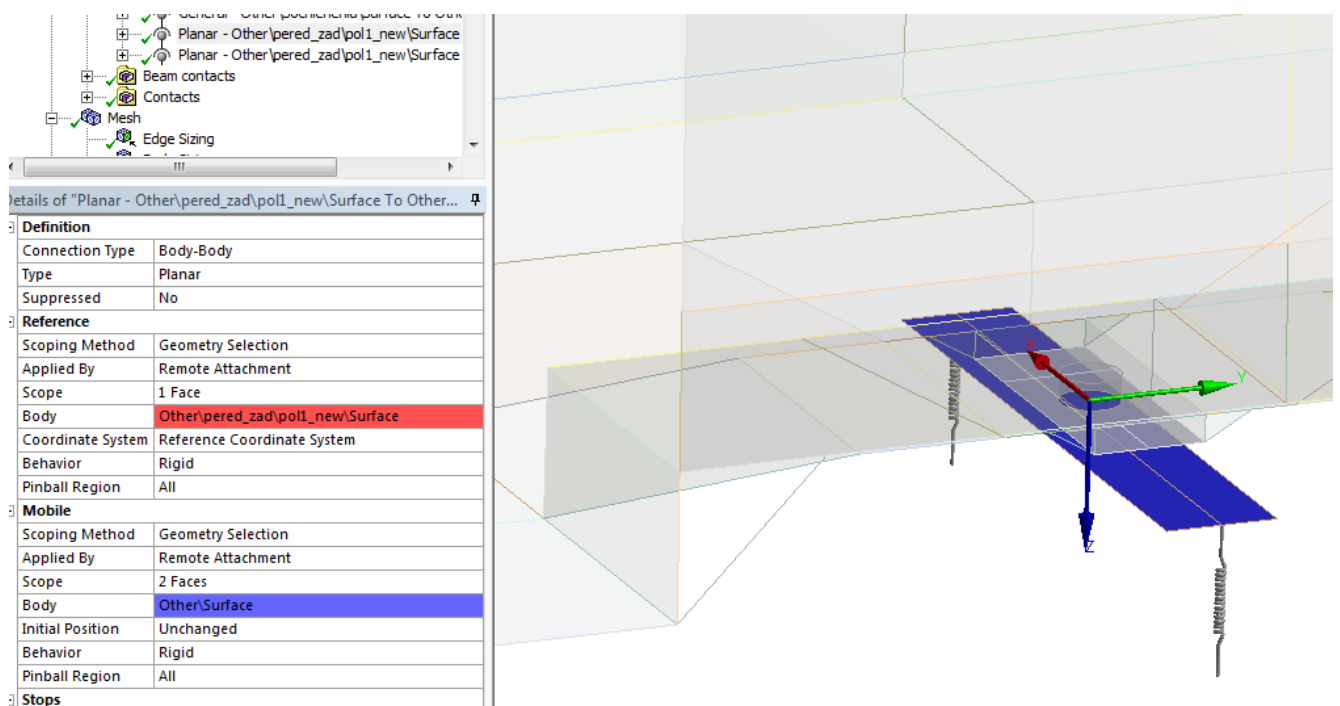


General joints – шарниры в узлах сочленения секций;

Planar joints – шарниры в шкворневых элементах головной и тыльной секций

Рисунок А.3 – Пример настроек шарнира узла сочленения между секциями

(всего 4 шт.)



General joints – шарниры в узлах сочленения секций;

Planar joints – шарниры в шкворневых элементах головной и тыльной секций

Рисунок А.4 – Пример настроек шарнира в шкворневом элементе секции вагона

(всего 2 шт.)

Details of 'Longitudinal - Ground To Other\Surface'	
<b>Graphics Properties</b>	
<b>Definition</b>	
Type	Longitudinal
Spring Behavior	Both
<input type="checkbox"/> Longitudinal Stiffness	460, N/mm
<input type="checkbox"/> Longitudinal Damping	0, N-s/mm
Preload	None
Suppressed	No
Spring Length	400, mm
<b>Scope</b>	
Scope	Body-Ground
<b>Reference</b>	
Coordinate System	Global Coordinate System
Reference X Coordinate	-9300, mm
Reference Y Coordinate	-622,13 mm
Reference Z Coordinate	850, mm
Reference Location	Click to Change
<b>Mobile</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Applied By	Remote Attachment
Scope	1 Vertex
Body	Other\Surface
Coordinate System	Global Coordinate System
Mobile X Coordinate	-9300, mm
Mobile Y Coordinate	-222,13 mm
Mobile Z Coordinate	850, mm
Behavior	Rigid
Pinball Region	All

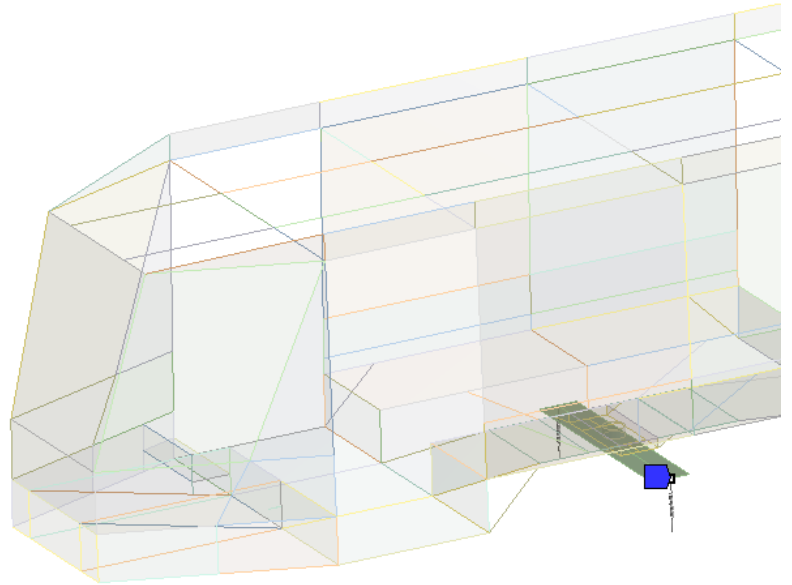


Рисунок А.5 – Пример настроек пружинного элемента, отвечающего за поддресоривание вагона (всего 2 шт.)

Details of "Bonded - Other\tel\80x60x4 To Other\tel\Surface"	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Vertex
Target	6 Edges
Contact Bodies	Other\tel\80x60x4
Target Bodies	Other\tel\Surface
Shell Thickness Effect	No
<b>Definition</b>	
Type	Bonded
Scope Mode	Manual
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
<b>Advanced</b>	
Formulation	MPC
Constraint Type	Inside Pinball, Couple U to ROT
Pinball Region	Radius
Pinball Radius	70, mm

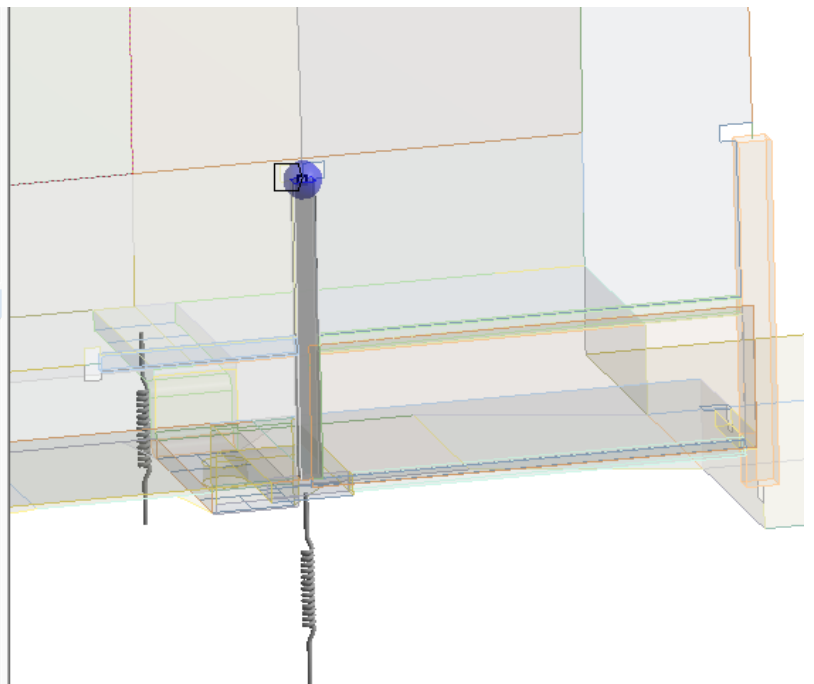


Рисунок А.6– Пример настроек контактного алгоритма для сопряжения каркаса из балочных и оболочечных конечных элементов (всего 5 шт.)

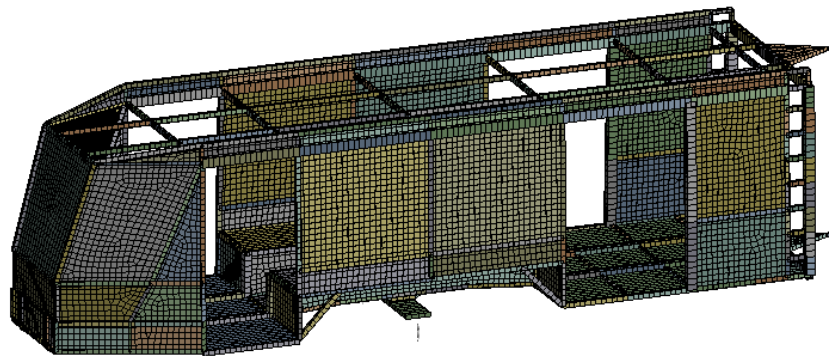
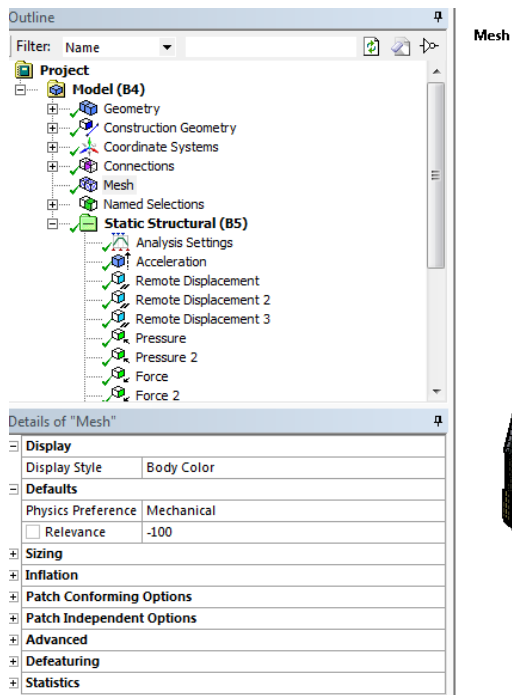


Рисунок А.7– Общие настройки конечно-элементной сетки модели кузова трамвайного вагона

#### B: Static Structural

Static Structural

Time: 1, s

- A** Acceleration: 26591 mm/s<sup>2</sup>
- B** Remote Displacement
- C** Remote Displacement 2
- D** Remote Displacement 3
- E** Pressure: 3,607e-003 MPa
- F** Pressure 2: 1,942e-003 MPa
- G** Force: 76390 N
- H** Force 2: 50000 N
- I** Displacement

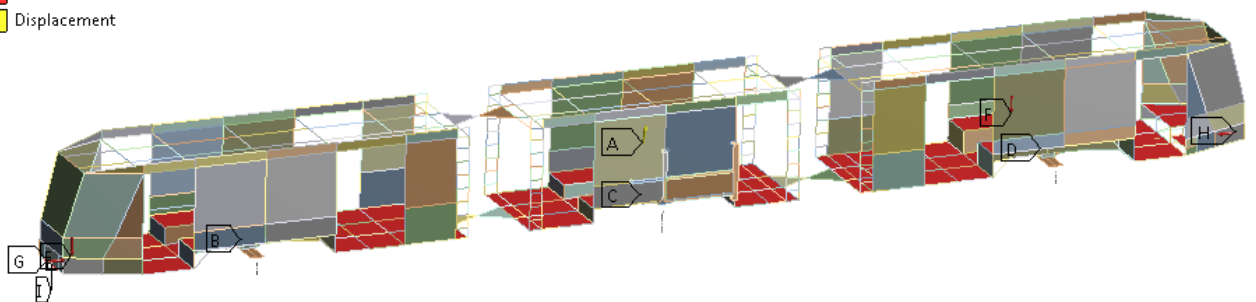


Рисунок А.8– Граничные условия и нагрузки конечно-элементной модели кузова

## A.2 Конечно-элементная модель типовой панели

Outline of Schematic A2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data			Description
2	Material			
3	DivinyCell			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	GFRP			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
5	Glue			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
6	Screws			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
7	Structural Steel			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: DivinyCell				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Isotropic Elasticity			
3	Derive from	Shear Modulus and Poisson'...		
4	Young's Modulus	8,046E+07	Pa	
5	Poisson's Ratio	0,49		
6	Bulk Modulus	1,341E+09	Pa	
7	Shear Modulus	2,7E+07	Pa	
8	Field Variables			

Properties of Outline Row 4: GFRP				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Isotropic Elasticity			
3	Derive from	Young's Modulus and Poisso...		
4	Young's Modulus	1,3E+10	Pa	
5	Poisson's Ratio	0,23		
6	Bulk Modulus	8,0247E+09	Pa	
7	Shear Modulus	5,2846E+09	Pa	
8	Field Variables			

Properties of Outline Row 5: Glue				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Isotropic Elasticity			
3	Derive from	Young's Modulus and Poisso...		
4	Young's Modulus	4E+06	Pa	
5	Poisson's Ratio	0,485		
6	Bulk Modulus	4,4444E+07	Pa	
7	Shear Modulus	1,3468E+06	Pa	
8	Field Variables			

Properties of Outline Row 6: Screws				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Isotropic Elasticity			
3	Derive from	Young's Modulus and Poisso...		
4	Young's Modulus	4,5E+10	Pa	
5	Poisson's Ratio	0,3		
6	Bulk Modulus	3,75E+10	Pa	
7	Shear Modulus	1,7308E+10	Pa	
8	Field Variables			

Properties of Outline Row 7: Structural Steel				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Isotropic Elasticity			
3	Derive from	Young's Modulus and Poisso...		
4	Young's Modulus	2E+11	Pa	
5	Poisson's Ratio	0,3		
6	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
7	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	

Screws – материал эквивалентных по сдвиговой жесткости самонарезающих винтов

Structural steel – материал стального каркаса

DivinyCell – материал заполнителя типовой панели;

GFRP – материал обшивки типовой панели;

Рисунок А.9 – Свойства материалов конечно-элементной модели типовой панели

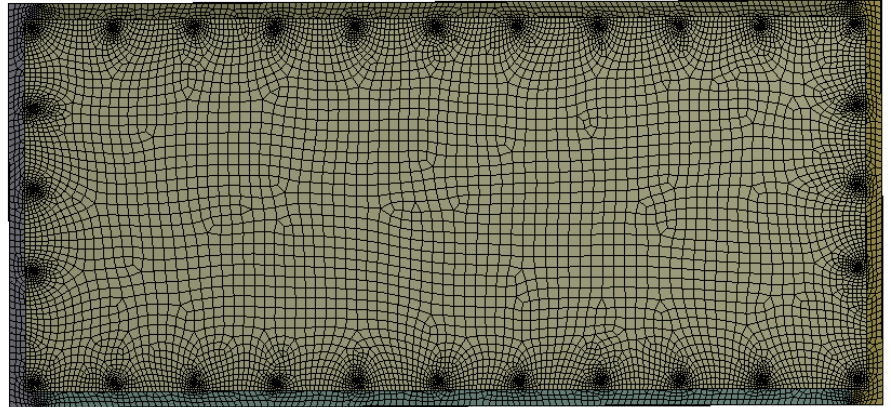
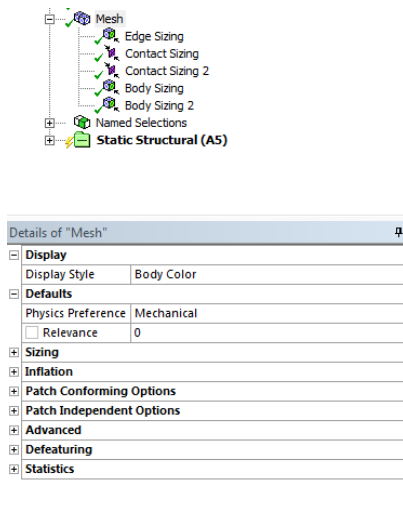


Рисунок А.10 – Общий вид и общие настройки конечно-элементной сетки типовой панели

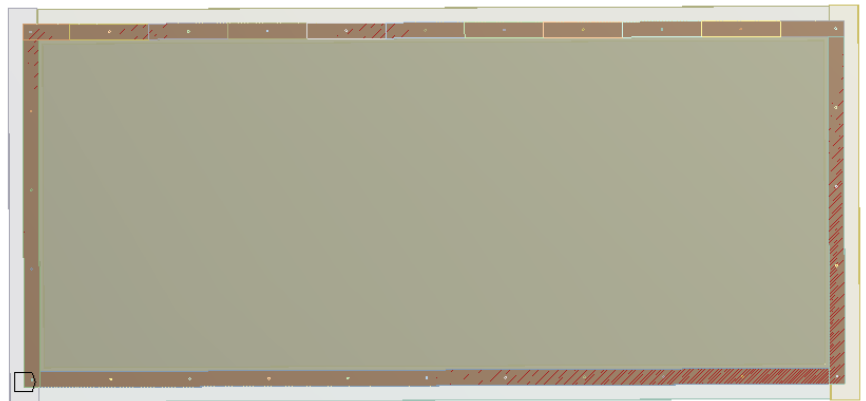
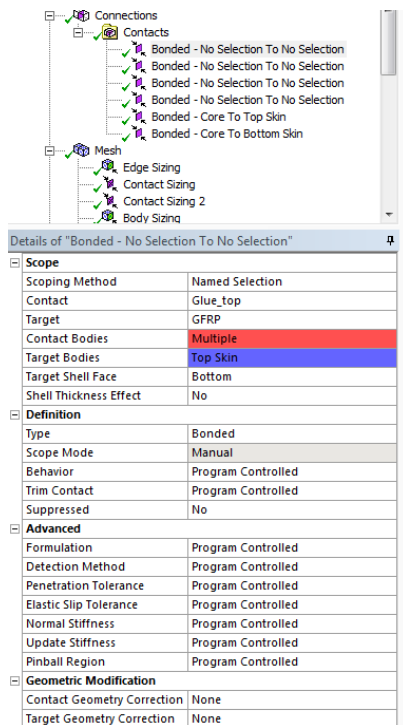


Рисунок А.11 – Пример настроек контактного алгоритма типа bonded (между именованными наборами –named selections)





Рисунок А.12 – Граничные условия и нагрузки на конечно-элементную модель типовой панели (вид с внутренней стороны панели)

### А.3 Конечно-элементная модель клеомеханического нахлесточного соединения при квазистатическом нагружении

Material				
3	Adhesive			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	HASP			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
5	HASP damaged			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
6	Structural Steel_plastic			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: Adhesive				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	
3	Uniaxial Test Data	Tabular		
4	Scale	1		
5	Offset	0	MPa	
6	Mooney-Rivlin 2 Parameter			
7	Material Constant C10	7,279E+05	Pa	
8	Material Constant C01	55356	Pa	
9	Incompressibility Parameter D1	0	Pa <sup>-1</sup>	

Properties of Outline Row 4: HASP				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Modulus and Poisso...		
5	Young's Modulus	7,5E+09	Pa	
6	Poisson's Ratio	0,2		
7	Bulk Modulus	4,1667E+09	Pa	
8	Shear Modulus	3,125E+09	Pa	
9	Field Variables			
13	Bilinear Isotropic Hardening			
14	Yield Strength	7,5E+07	Pa	
15	Tangent Modulus	4E+09	Pa	

Adhesive – модель материала клеевого шва

HASP – модель материала ХАСП

Рисунок А.13 – Параметры моделей материалов конечно-элементной модели клеомеханического нахлесточного соединения, часть 1

Properties of Outline Row 5: HASP damaged				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Modulus and Poisso...		
5	Young's Modulus	4E+08	Pa	
6	Poisson's Ratio	0,2		
7	Bulk Modulus	2,2222E+08	Pa	
8	Shear Modulus	1,6667E+08	Pa	
9	Field Variables			
13	Bilinear Isotropic Hardening			
14	Yield Strength	7,5E+07	Pa	
15	Tangent Modulus	0	Pa	

Properties of Outline Row 6: Structural Steel_plastic				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Modulus and Poisso...		
5	Young's Modulus	2E+11	Pa	
6	Poisson's Ratio	0,3		
7	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
8	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
9	Field Variables			
13	Bilinear Isotropic Hardening			
14	Yield Strength	4,2E+08	Pa	
15	Tangent Modulus	0	Pa	

HASP damaged – модель материала ХАСП с редуцированными механическими характеристиками

Structural Steel\_plastic – модель материала самонарезающих винтов

Рисунок А.14 – Параметры моделей материалов конечно-элементной модели клеемеханического нахлесточного соединения, часть 2

Contacts

- Bonded - 1 To Lap\_23
- Bonded - 2 To Lap\_23
- Bonded - 1 To Multiple
- Bonded - 2 To Multiple
- Bonded - Lap\_23 To Multiple
- Bonded - Lap\_13 To Multiple
- Bonded - Adhesive To Multiple
- Bonded - Adhesive To Multiple

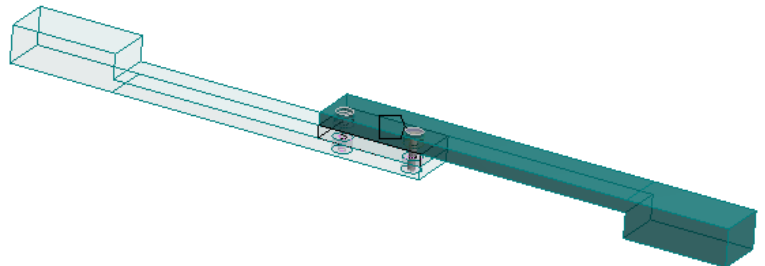
Mesh

Static Structural (A5)

- Analysis Settings
- Fixed Support

Details of "Bonded - 1 To Lap\_23"

<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	1
Target Bodies	Lap_23
<b>Definition</b>	
Type	Bonded
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
<b>Advanced</b>	
Formulation	MPC
Detection Method	Program Controlled
Pinball Region	Program Controlled
<b>Geometric Modification</b>	
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None



Для контактов «1 To Lap\_23» и «2 To Lap\_23» (контакт головок винтов и ХАСП) использована формулировка «MPC», для остальных – формулировка «Program Controlled»

Рисунок А.15 – Пример параметров контактного алгоритма склейки (bonded)

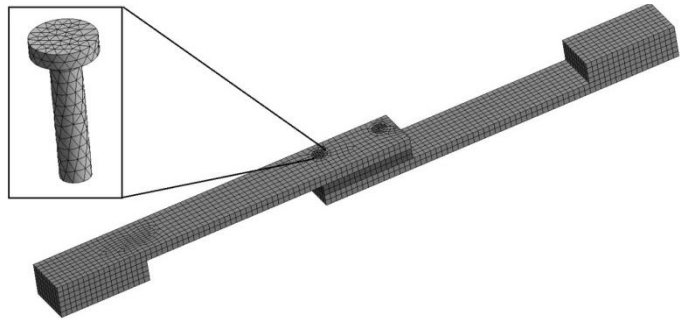
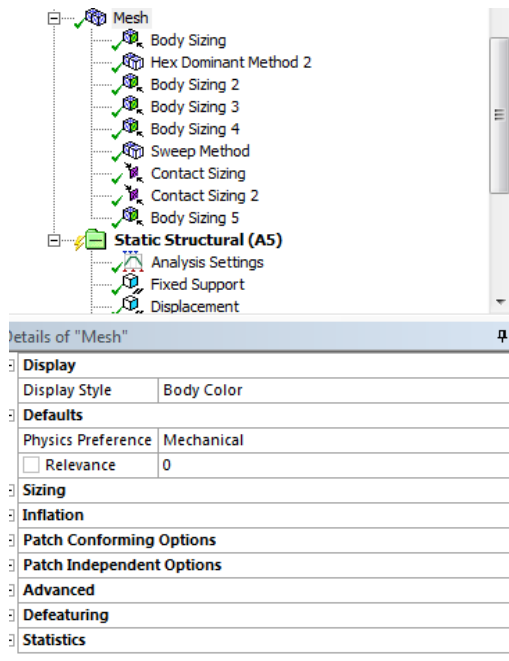
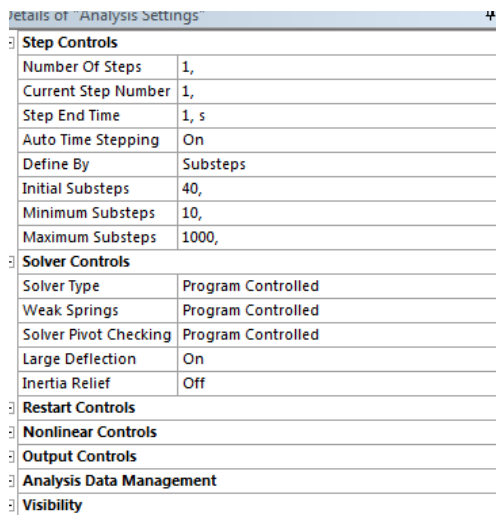


Рисунок А.16 – Общий вид и общие настройки конечно-элементной сетки



- A** Fixed Support
- B** Displacement
- C** Frictionless Support

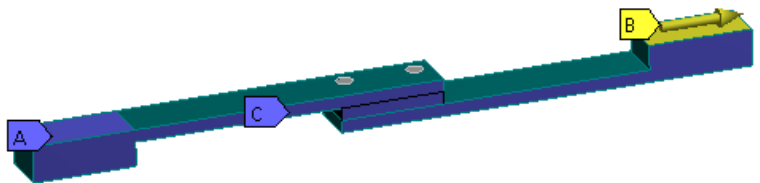


Рисунок А.17 – Граничные условия и нагрузки на конечно-элементную модель клеємеханического нахлесточного соединения, а также настройки решателя

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Экспериментальные диаграммы испытаний

## Б.1 Результаты испытаний макетов каркасно-панельной конструкции

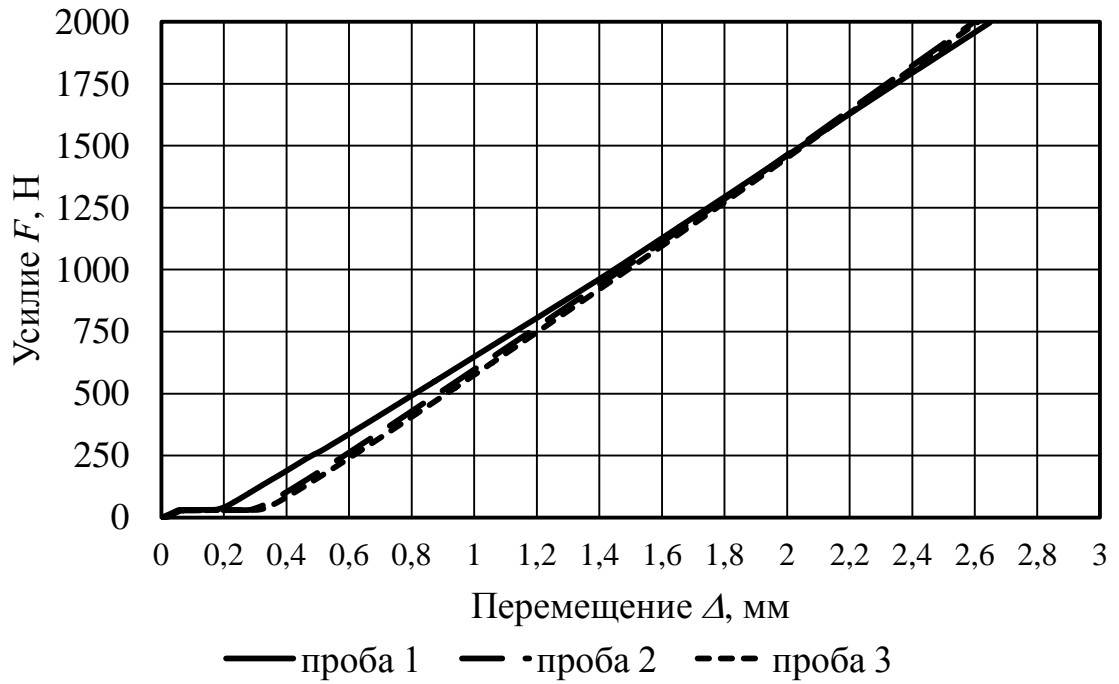


Рисунок Б.1 – Диаграмма испытаний макета КПК; тип – только каркас;  
образец №1

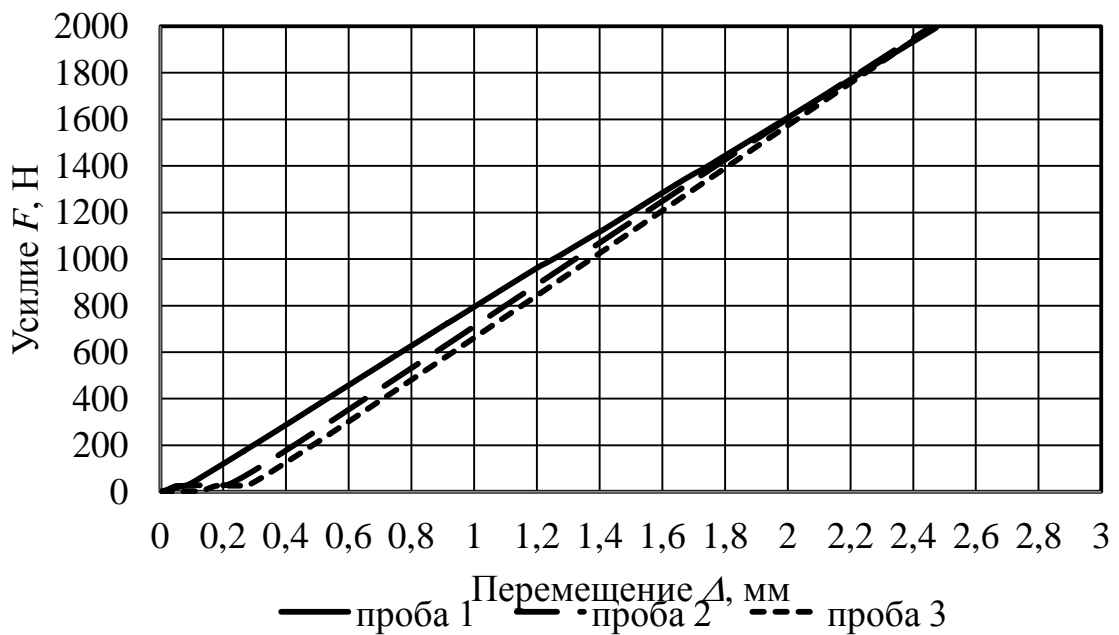


Рисунок Б.2 – Диаграмма испытаний макета КПК; тип – только каркас;  
образец №2

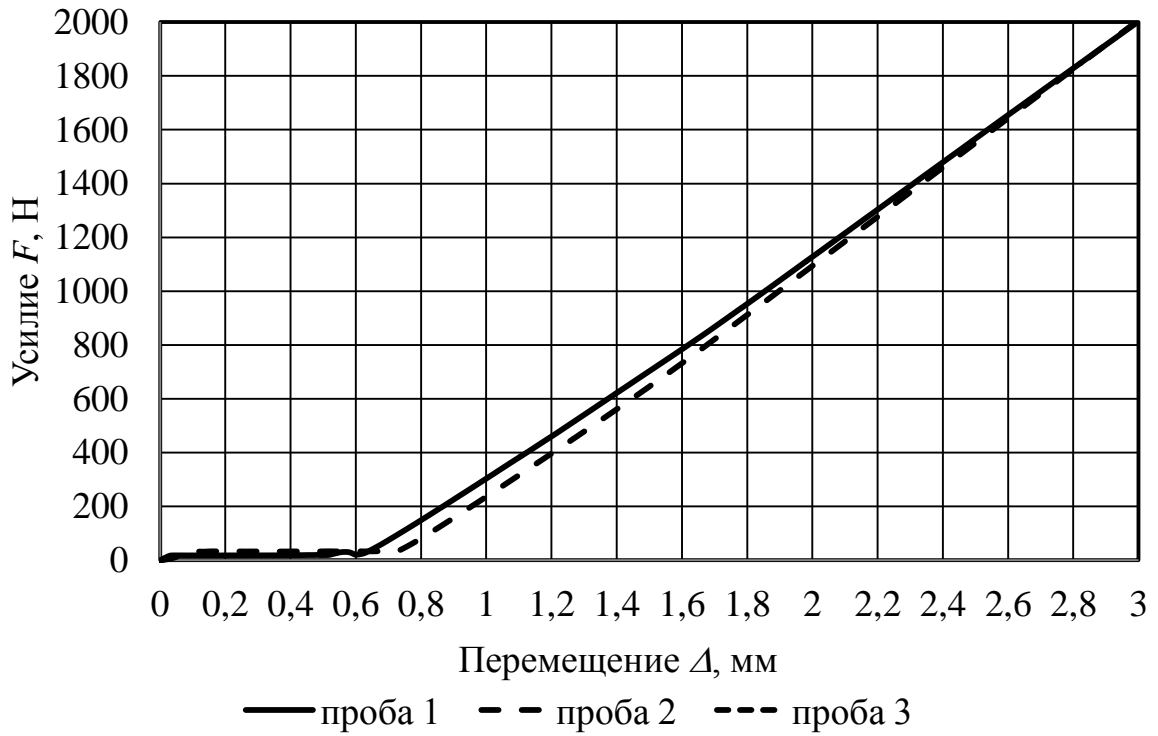


Рисунок Б.3 – Диаграмма испытаний макета КПК; тип – только каркас;  
образец №3

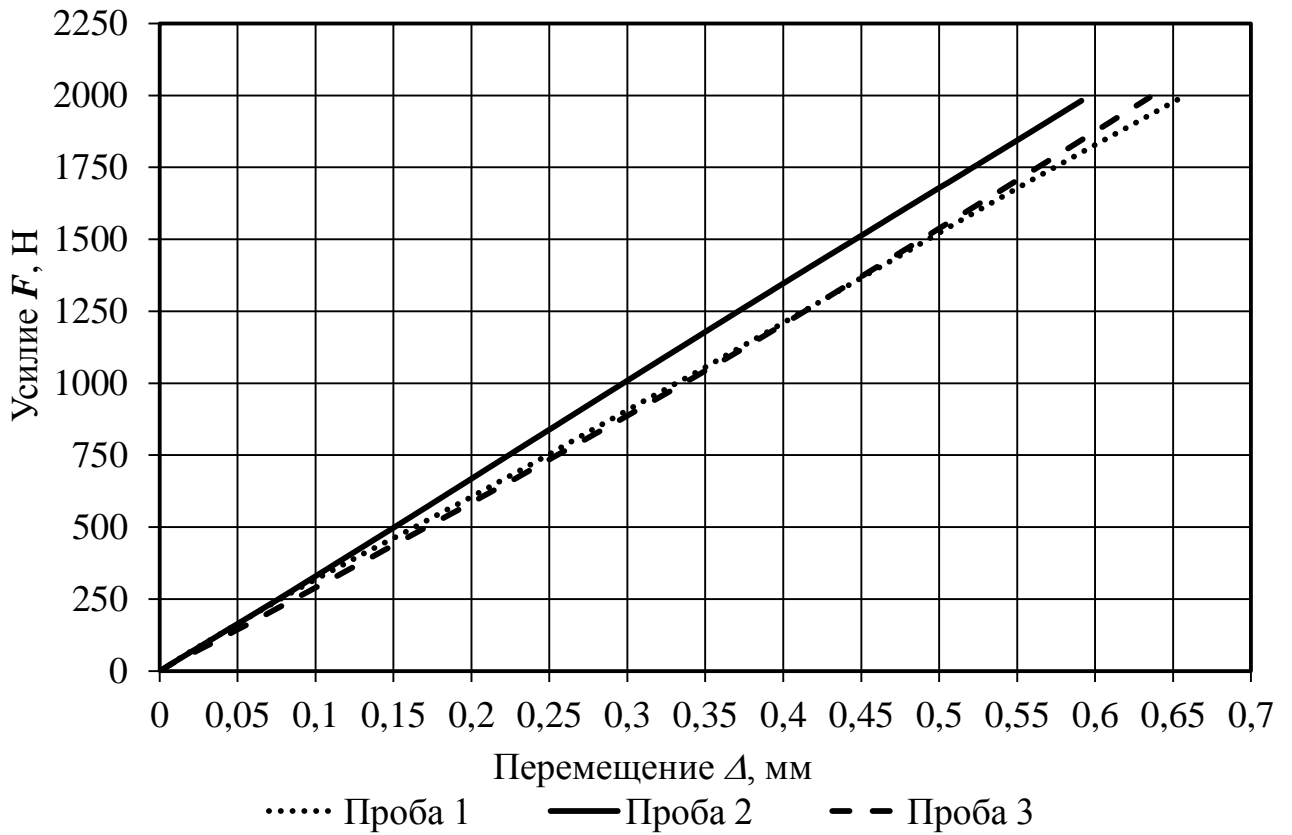


Рисунок Б.4 – Диаграмма испытаний макета КПК; тип – каркас с панелью,  
клеевые соединения; образец №1

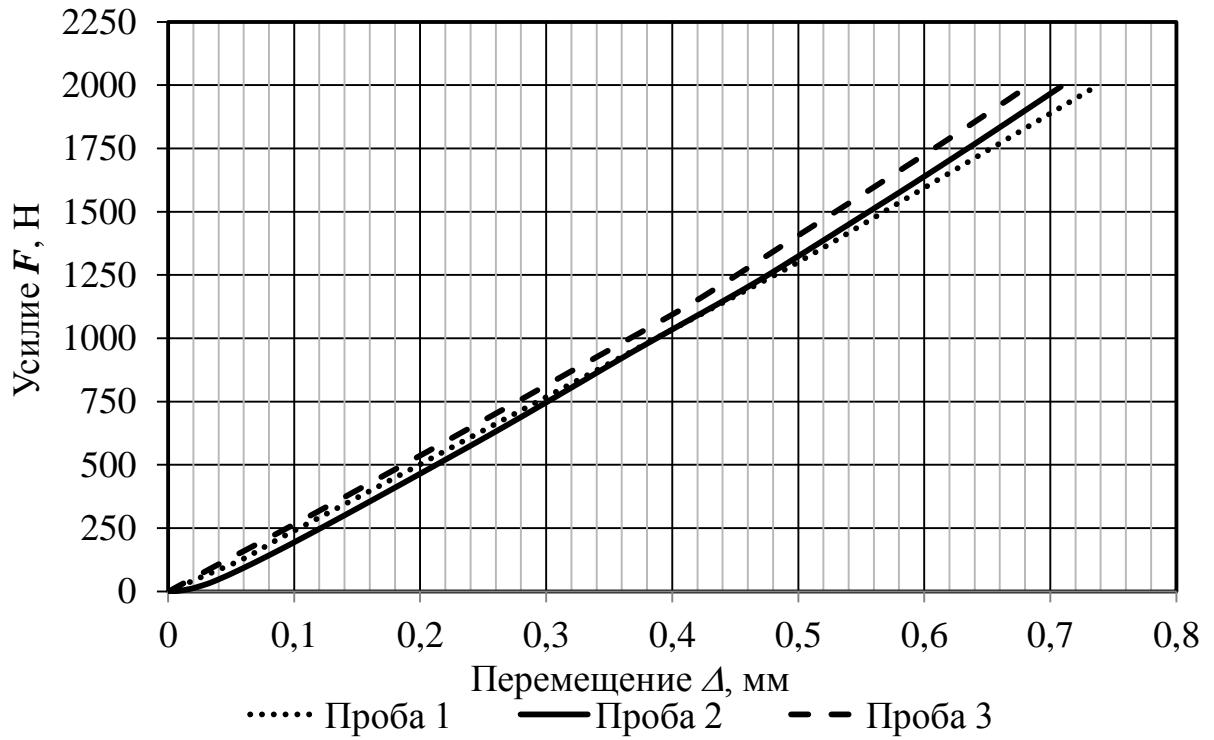


Рисунок Б.5 – Диаграмма испытаний макета КПК; тип – каркас с панелью, клеевые соединения; образец №2

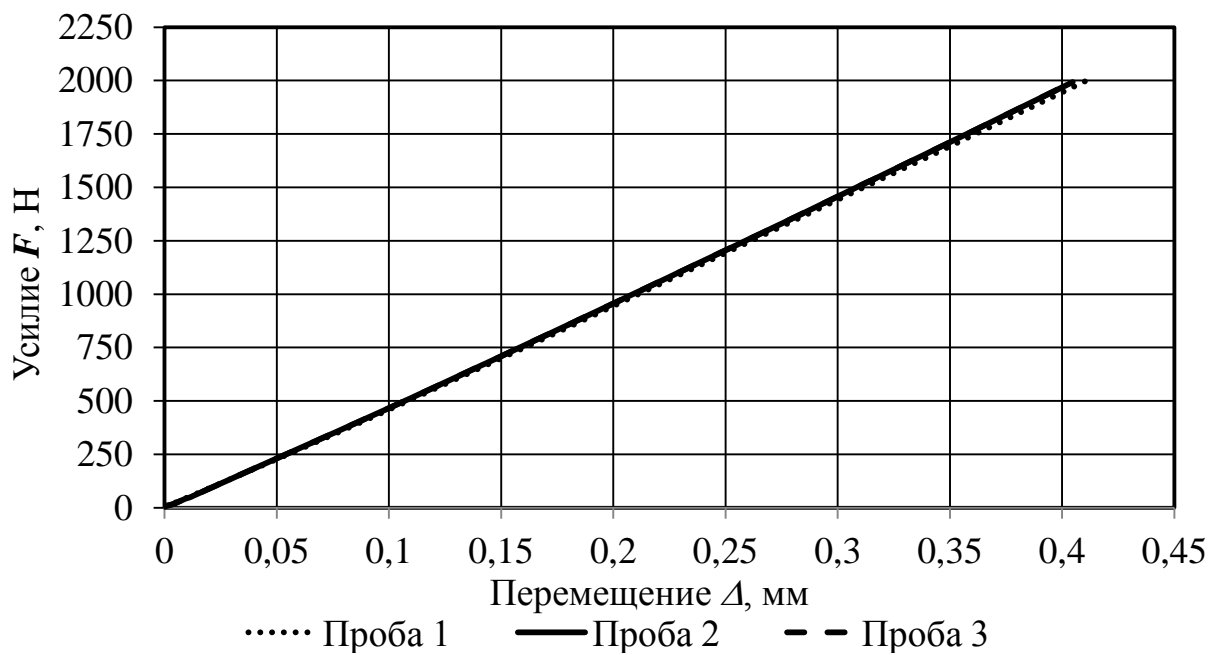


Рисунок Б.6 – Диаграмма испытаний макета КПК; тип – каркас с панелью и клеємеханическими соединениями, клеевые соединения; образец №1

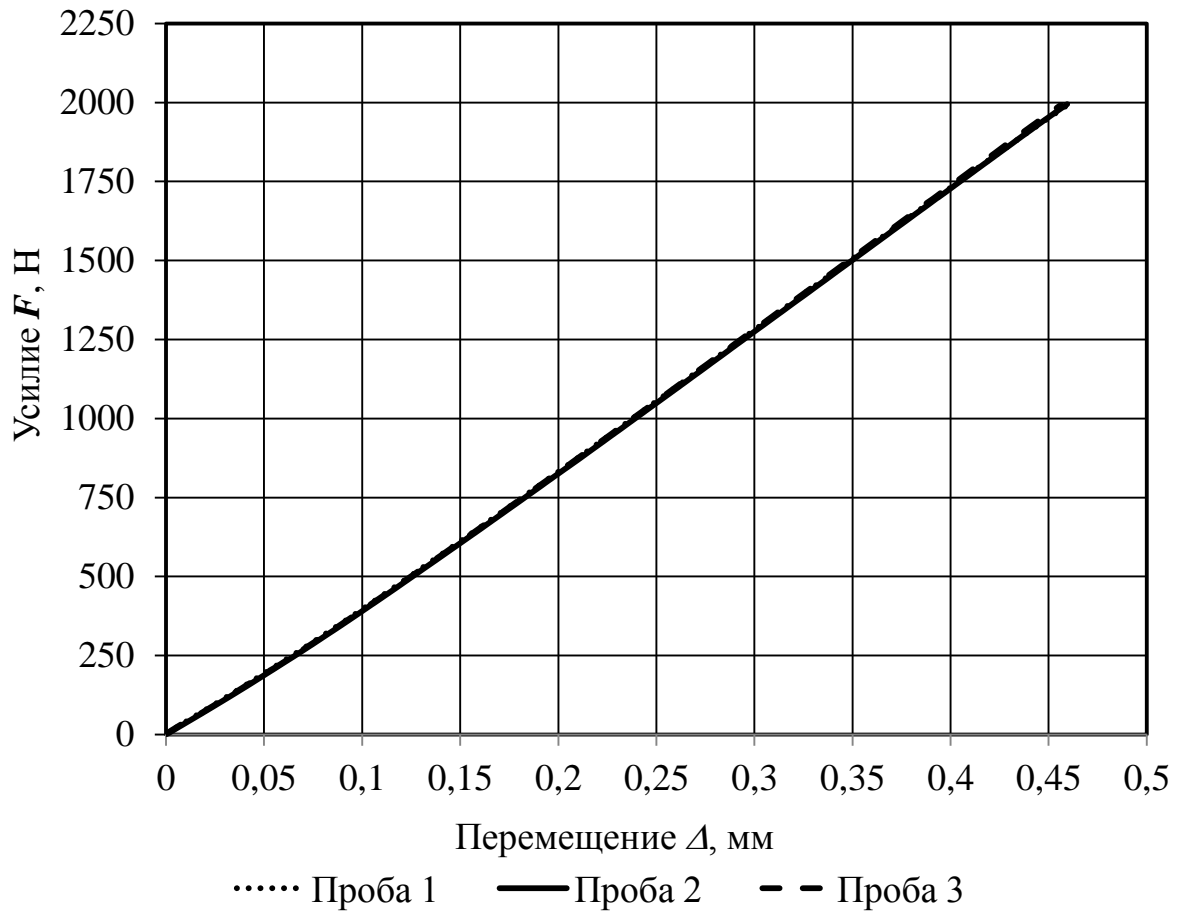


Рисунок Б.7 – Диаграмма испытаний макета КПК; тип – каркас с панелью и клеємеханическими соединениями, клеевые соединения; образец №2

**Б.2 Результаты испытаний на жесткость механических соединений с самонарезающими винтами**

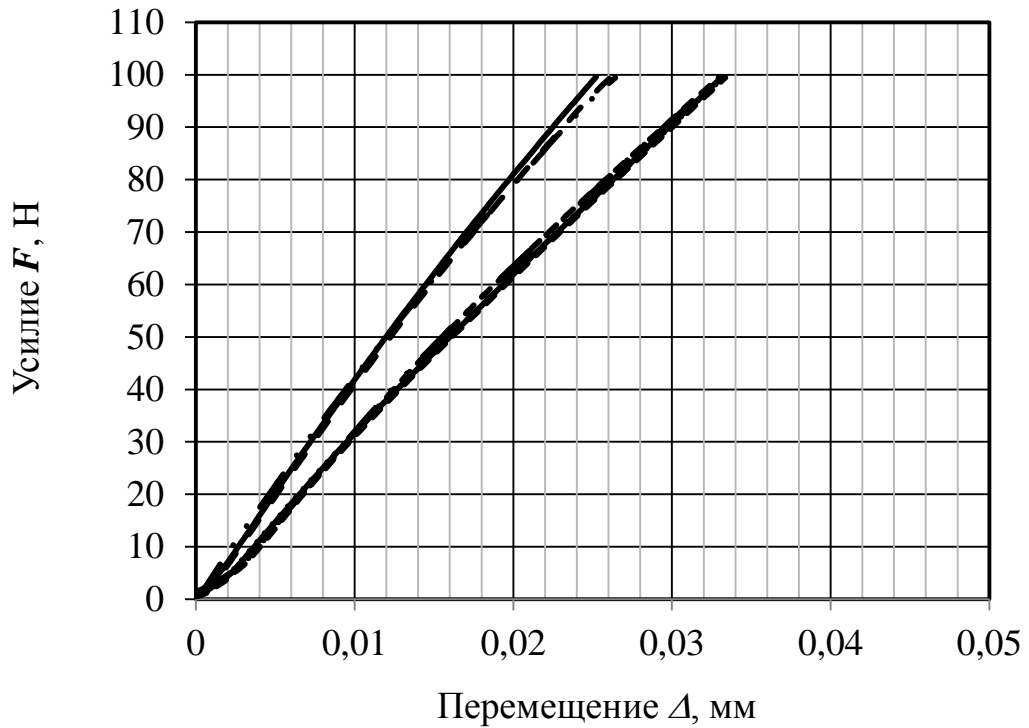


Рисунок Б.8 – Диаграммы испытаний механических соединений с зазором между пластинами 0 мм (3 образца по 3 испытания каждый)

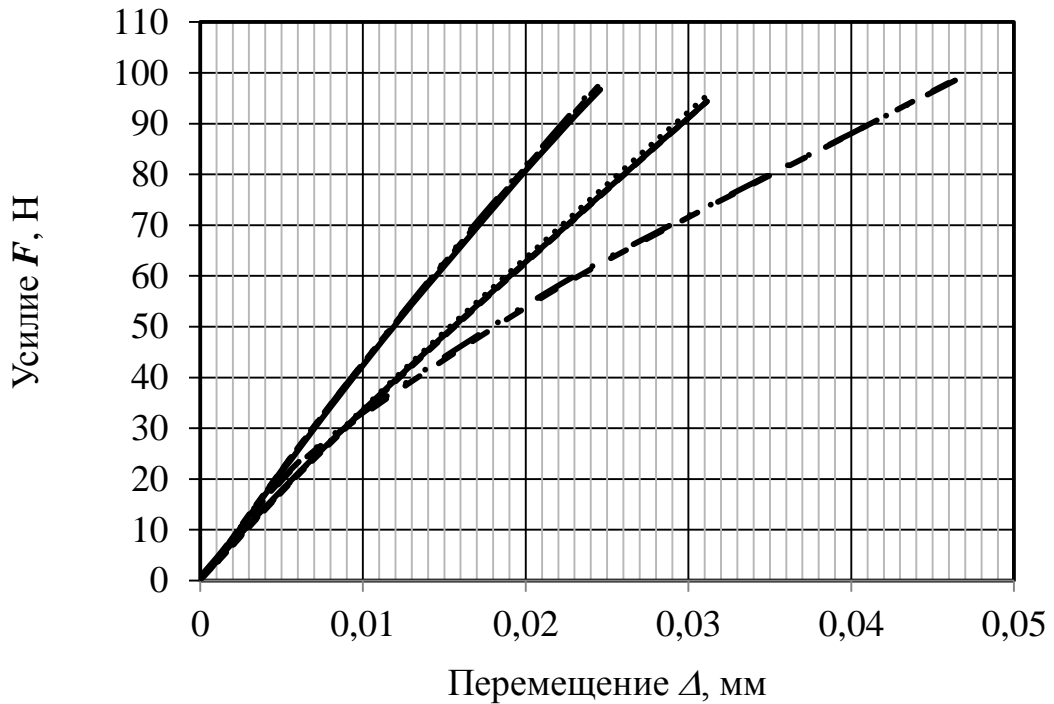


Рисунок Б.9 – Диаграммы испытаний механических соединений с зазором между пластинами 1 мм (3 образца по 3 испытания каждый)



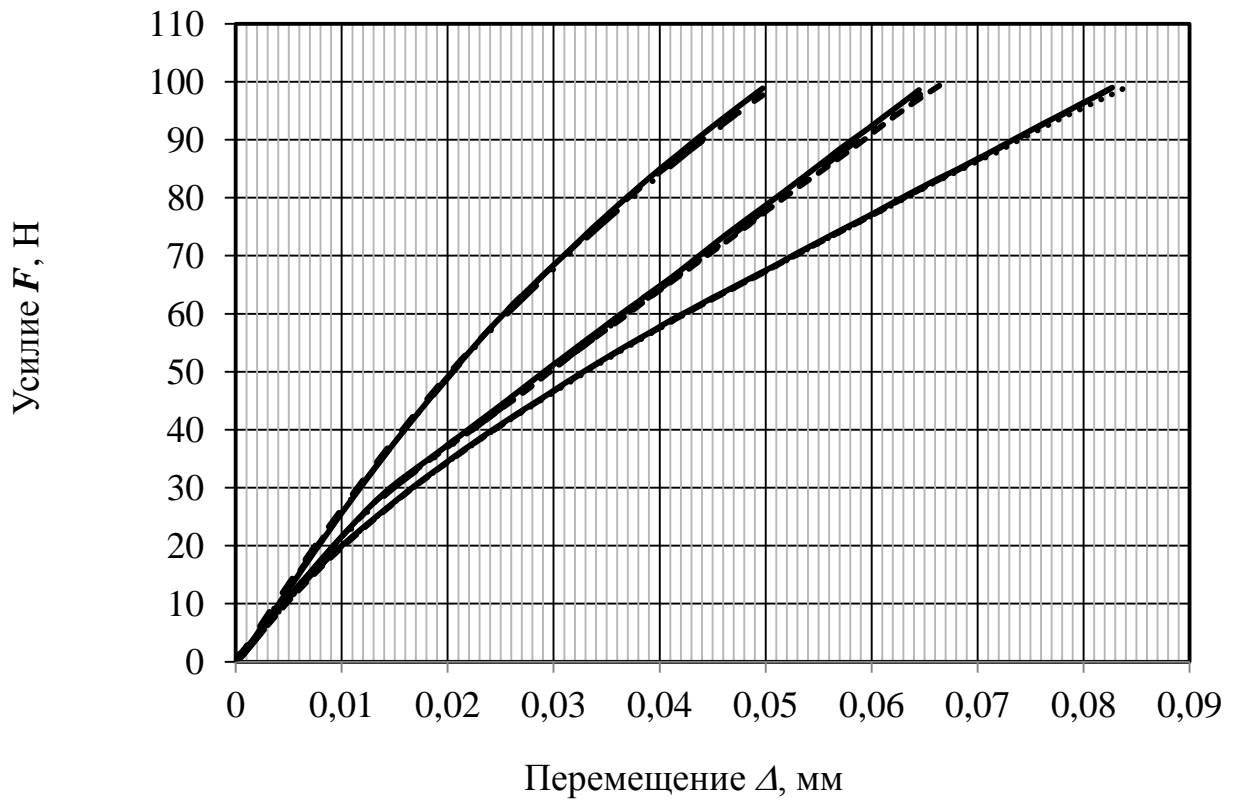


Рисунок Б.10 – Диаграммы испытаний механических соединений с зазором между пластинами 3 мм (3 образца по 3 испытания каждый)

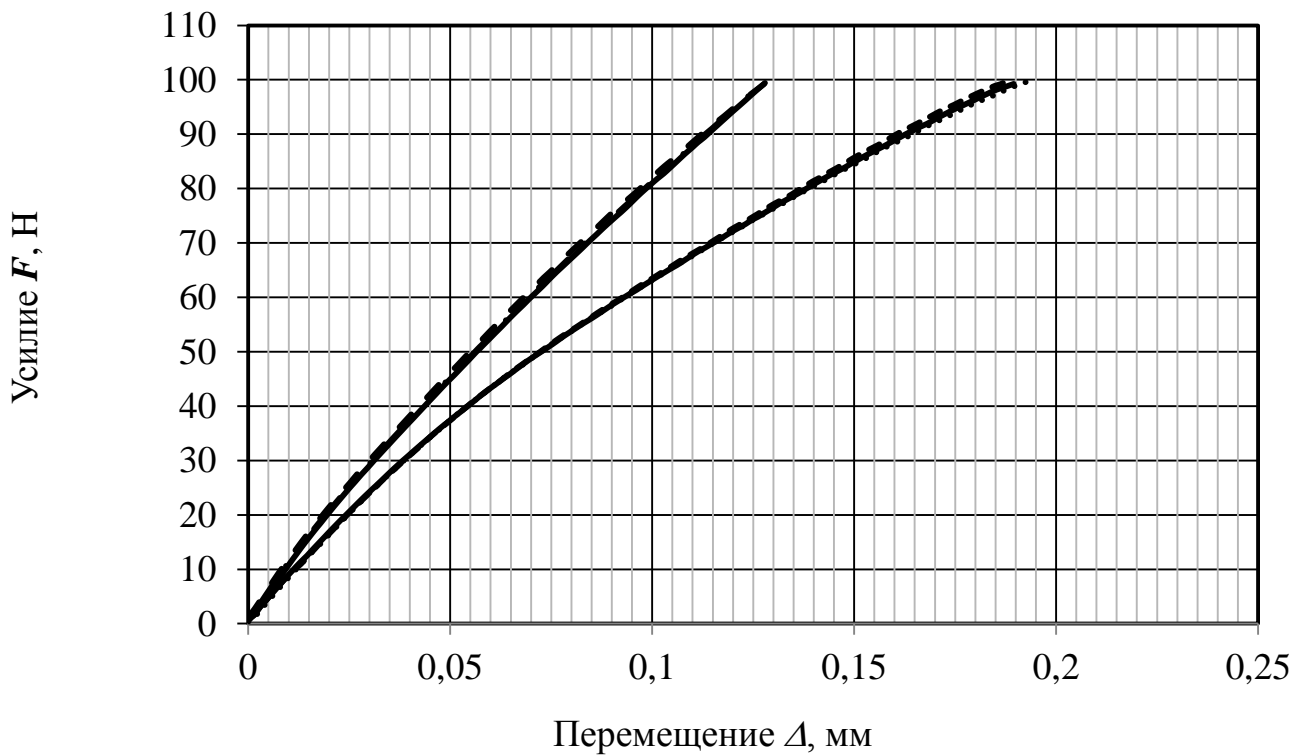


Рисунок Б.11 – Диаграммы испытаний механических соединений с зазором между пластинами 3 мм (2 образца по 3 испытания каждый)

**Б.3 Результаты испытаний образцов клеємеханических соединений при циклическом нагружении**

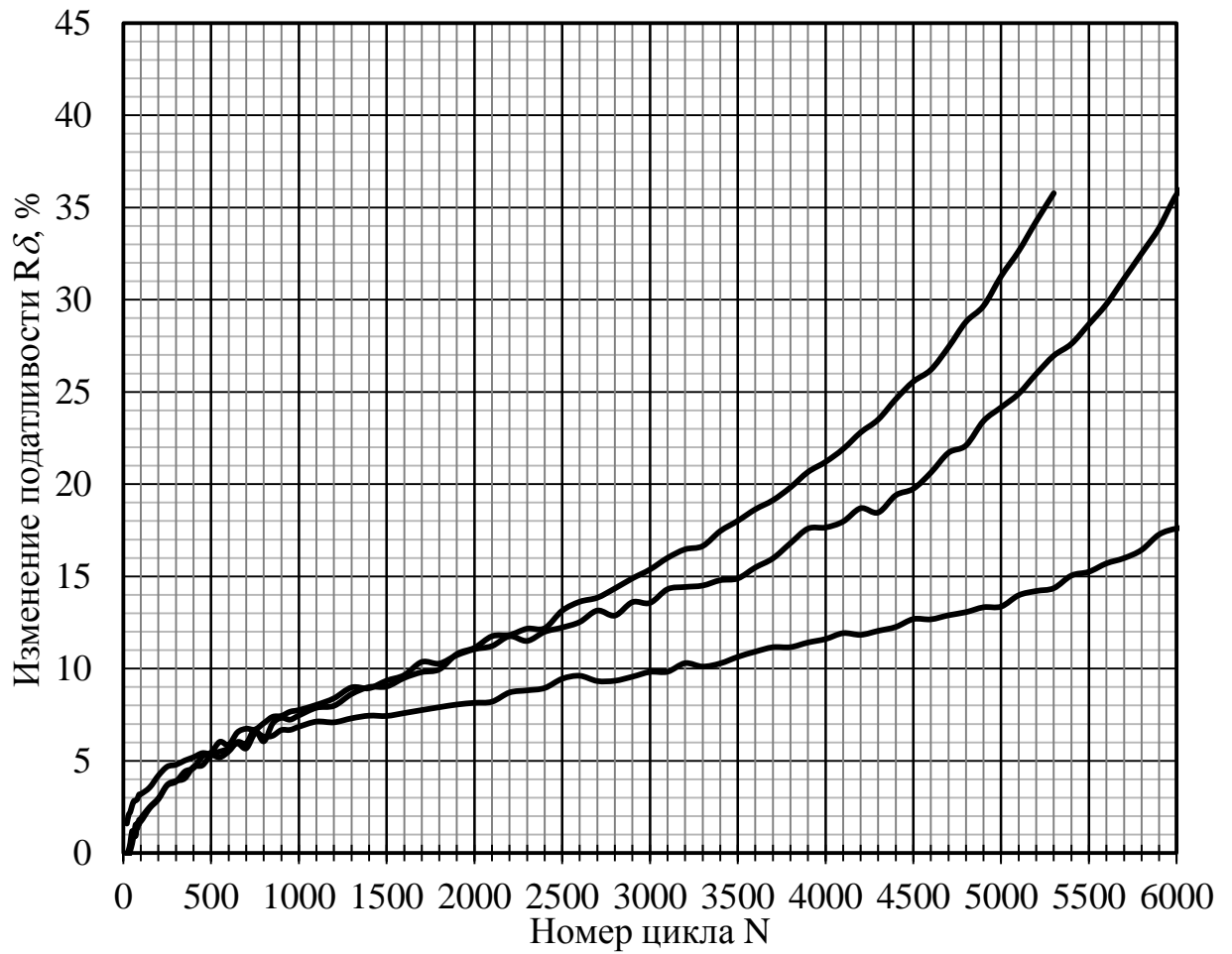


Рисунок Б.12 – Диаграммы изменения условной податливости в зависимости от номера цикла для группы модифицированных образцов, нагрузка 200 Н

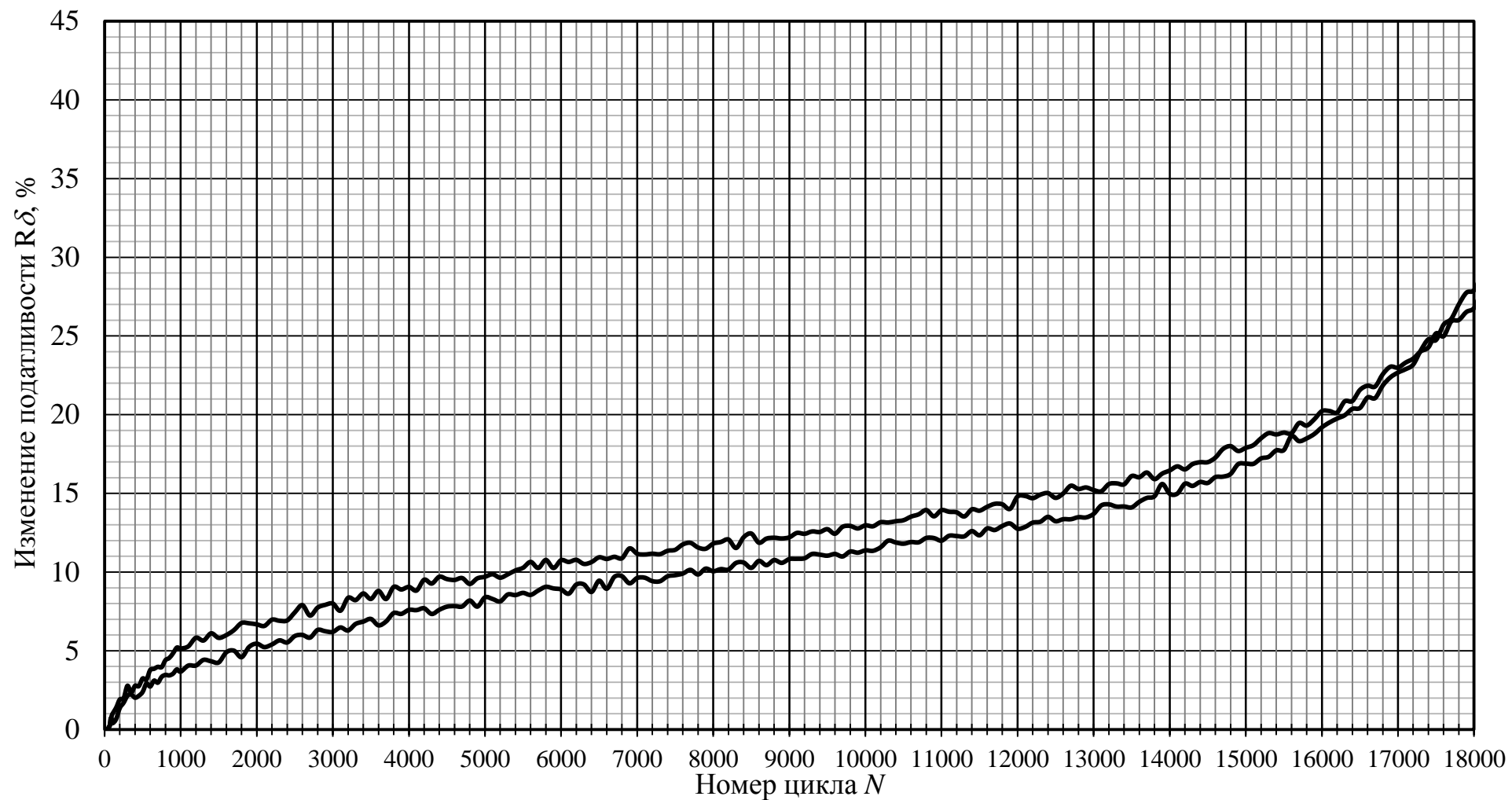


Рисунок Б.13 – Диаграммы изменения условной податливости в зависимости от номера цикла для группы модифицированных образцов, нагрузка 175 Н

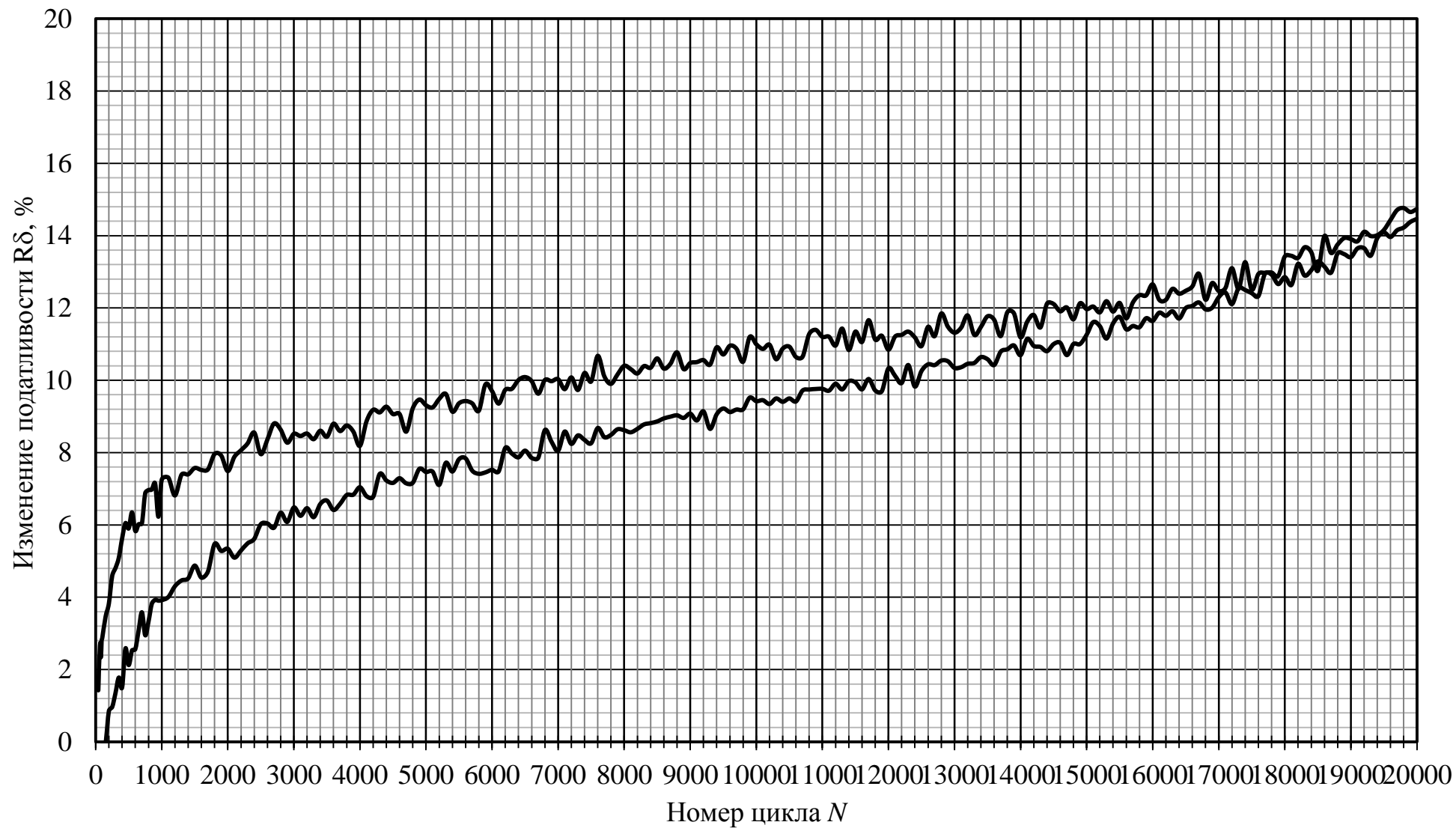


Рисунок Б.14 – Диаграммы изменения условной податливости в зависимости от номера цикла для группы модифицированных образцов, нагрузка 150 Н

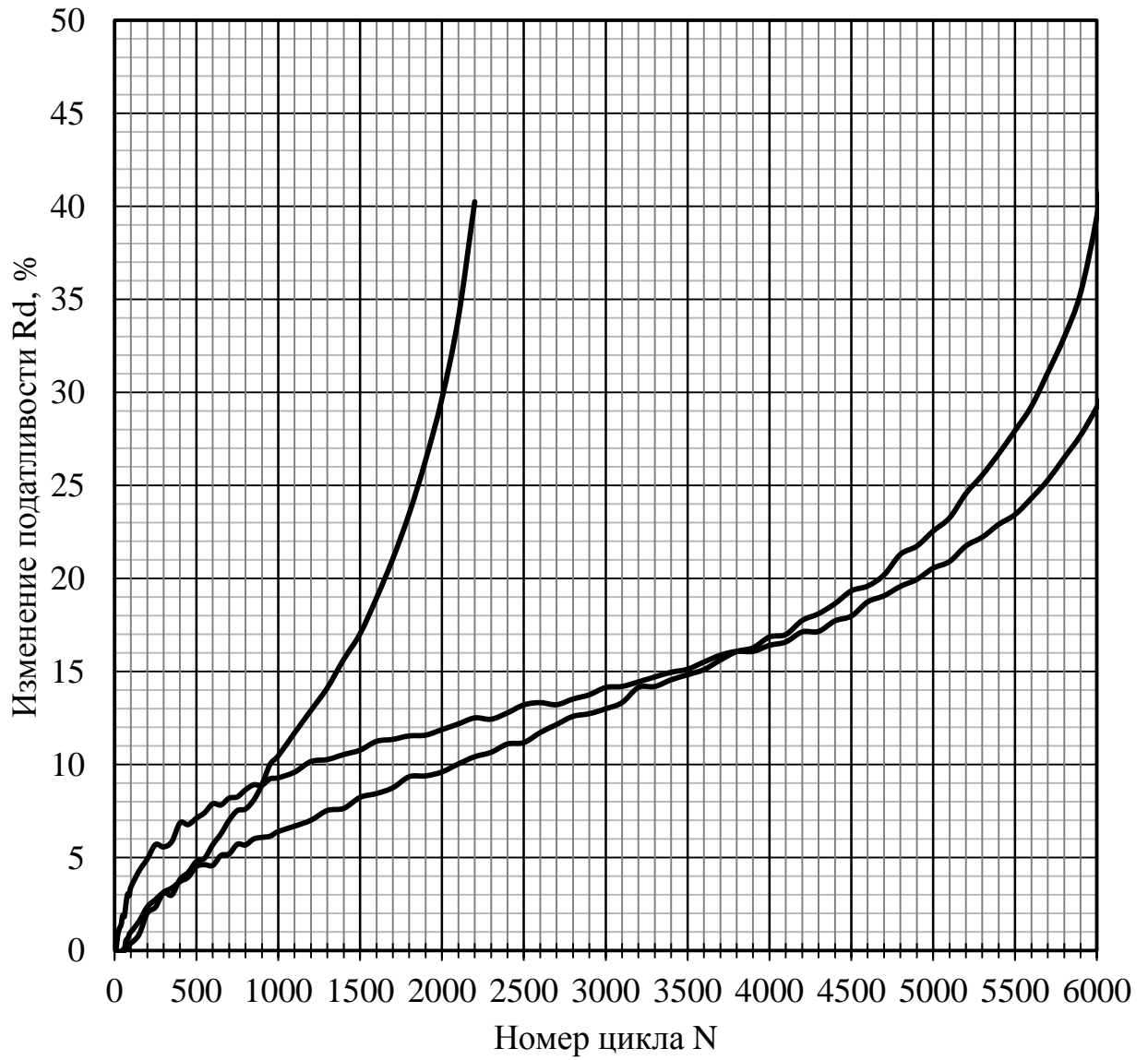


Рисунок Б.15 – Диаграммы изменения условной податливости в зависимости от номера цикла для группы исходных образцов, нагрузка 200 Н

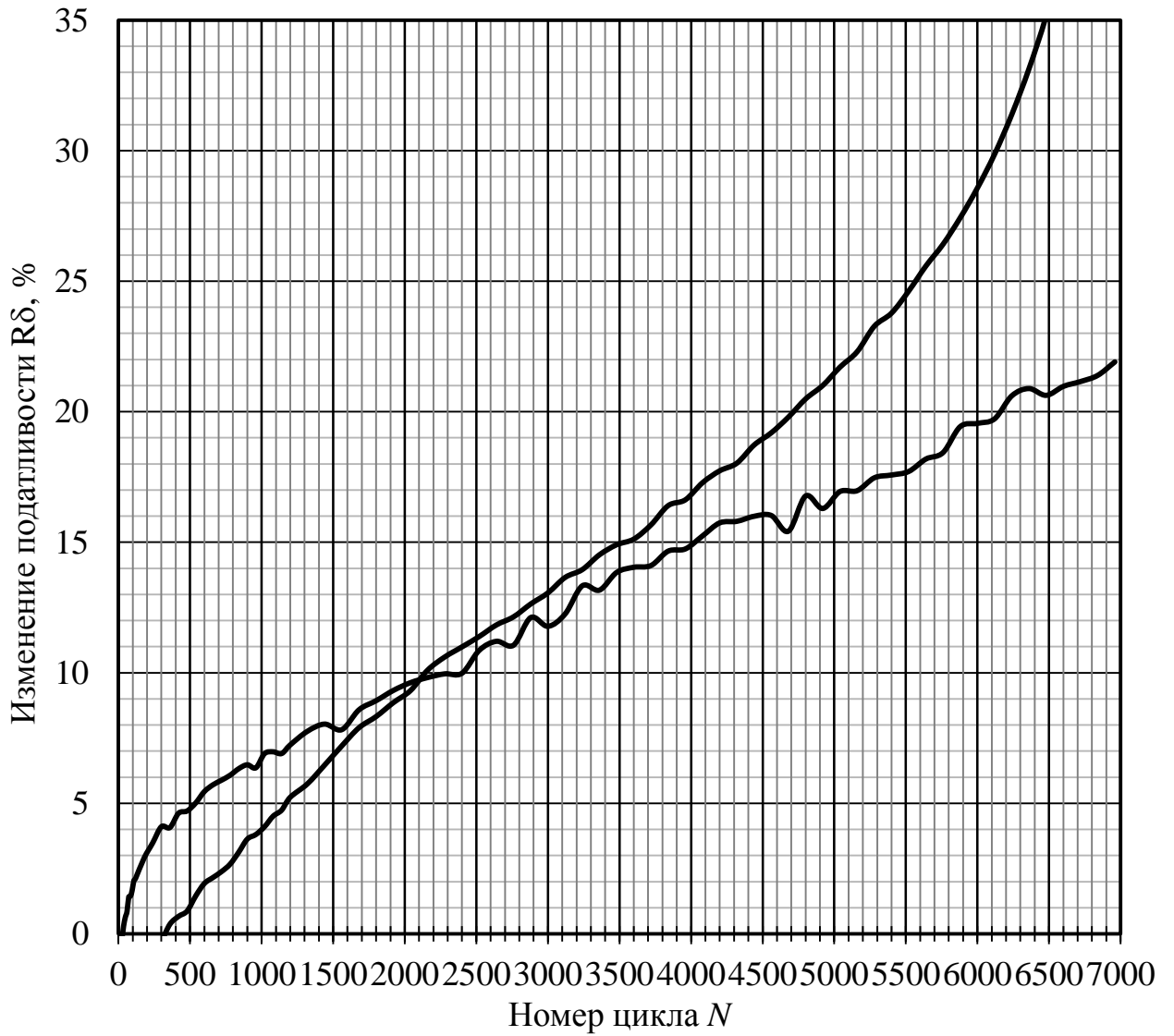


Рисунок Б.16 – Диаграммы изменения условной податливости в зависимости от номера цикла для группы исходных образцов, нагрузка 175 Н

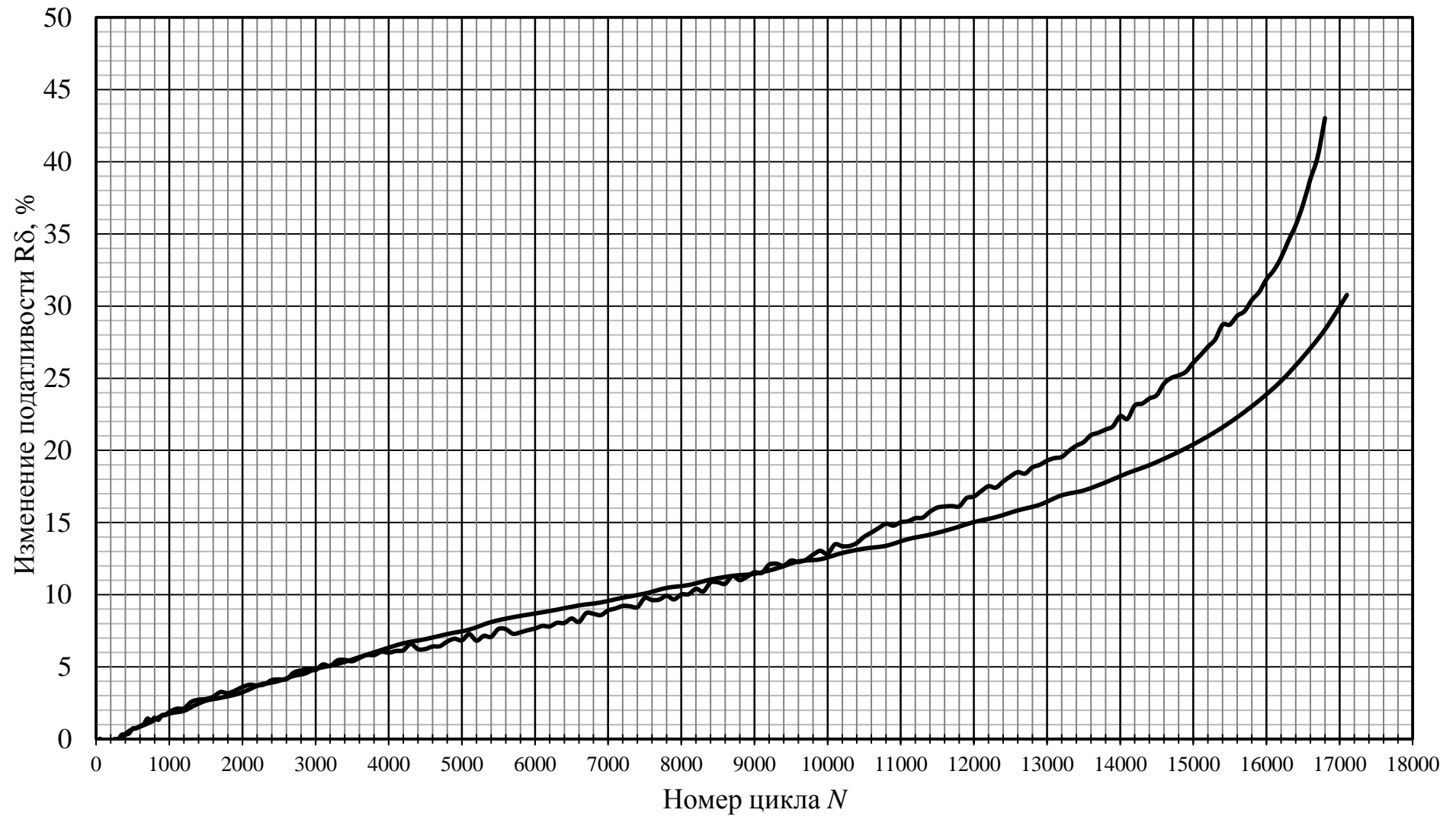


Рисунок Б.17 – Диаграммы изменения условной податливости в зависимости от номера цикла для группы исходных образцов, нагрузка 150 Н

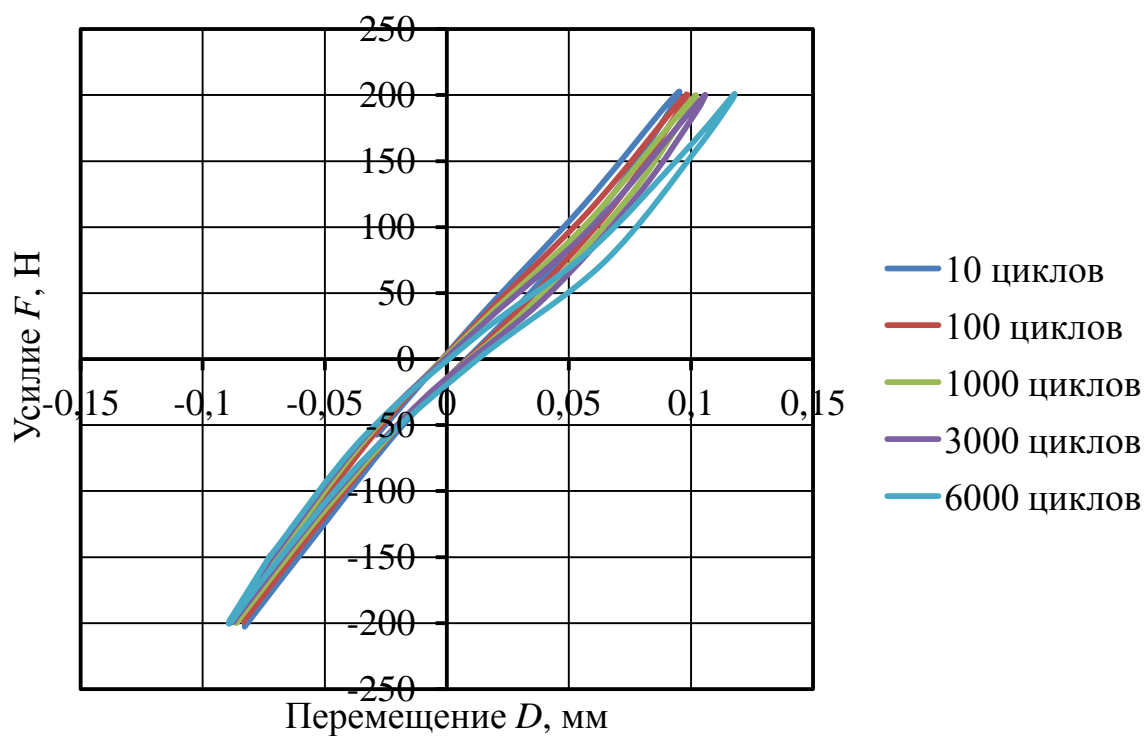


Рисунок Б.18 – Циклическая диаграмма «Усилие - перемещение» для модифицированного образца, нагрузка 200 Н

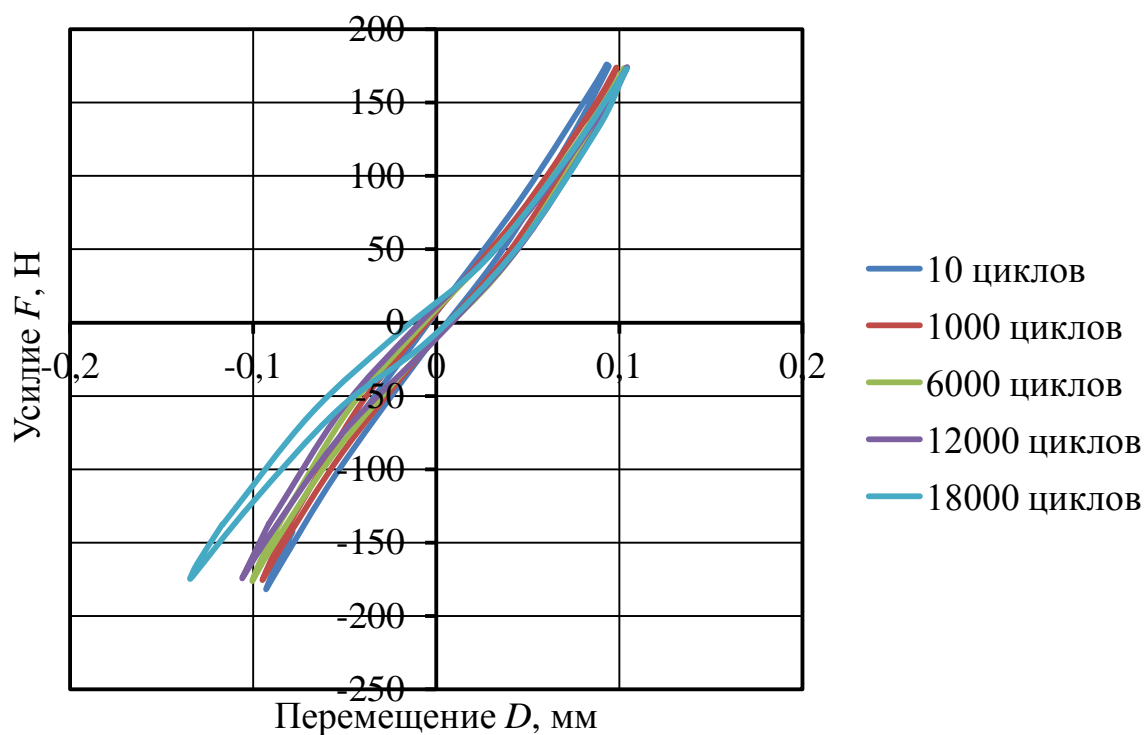


Рисунок Б.19 – Циклическая диаграмма «Усилие - перемещение» для модифицированного образца, нагрузка 175 Н



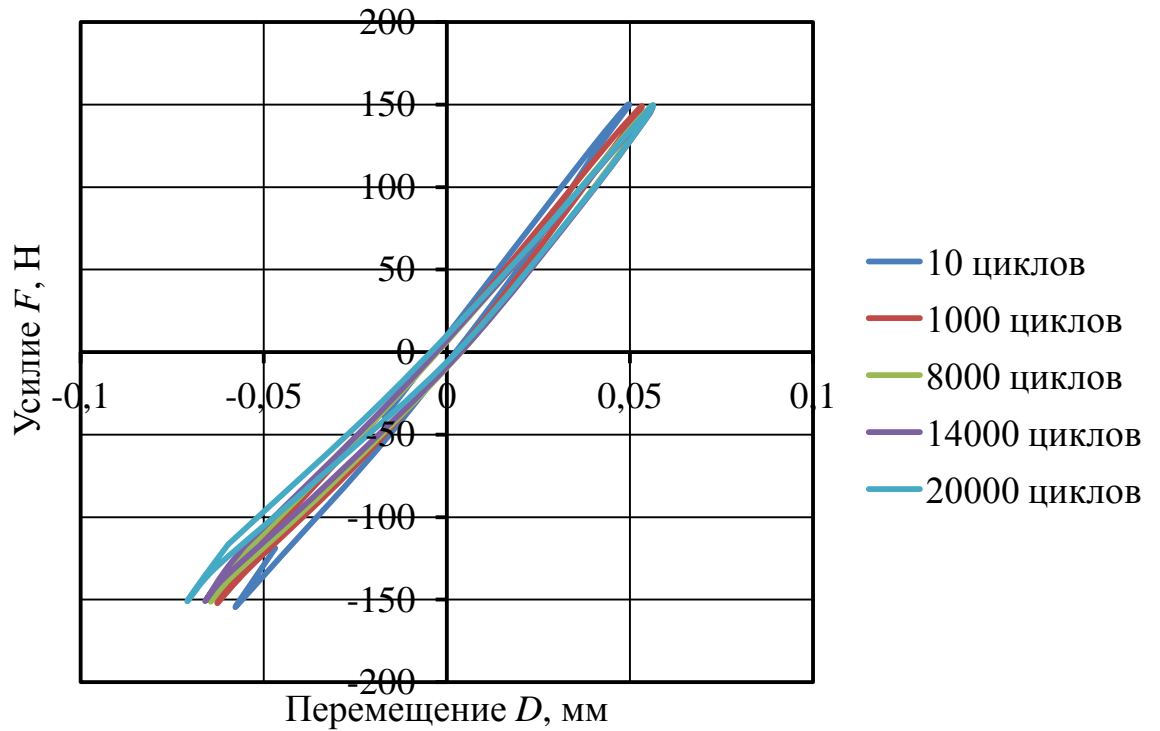


Рисунок Б.20 – Циклическая диаграмма «Усилие - перемещение» для модифицированного образца, нагрузка 150 Н

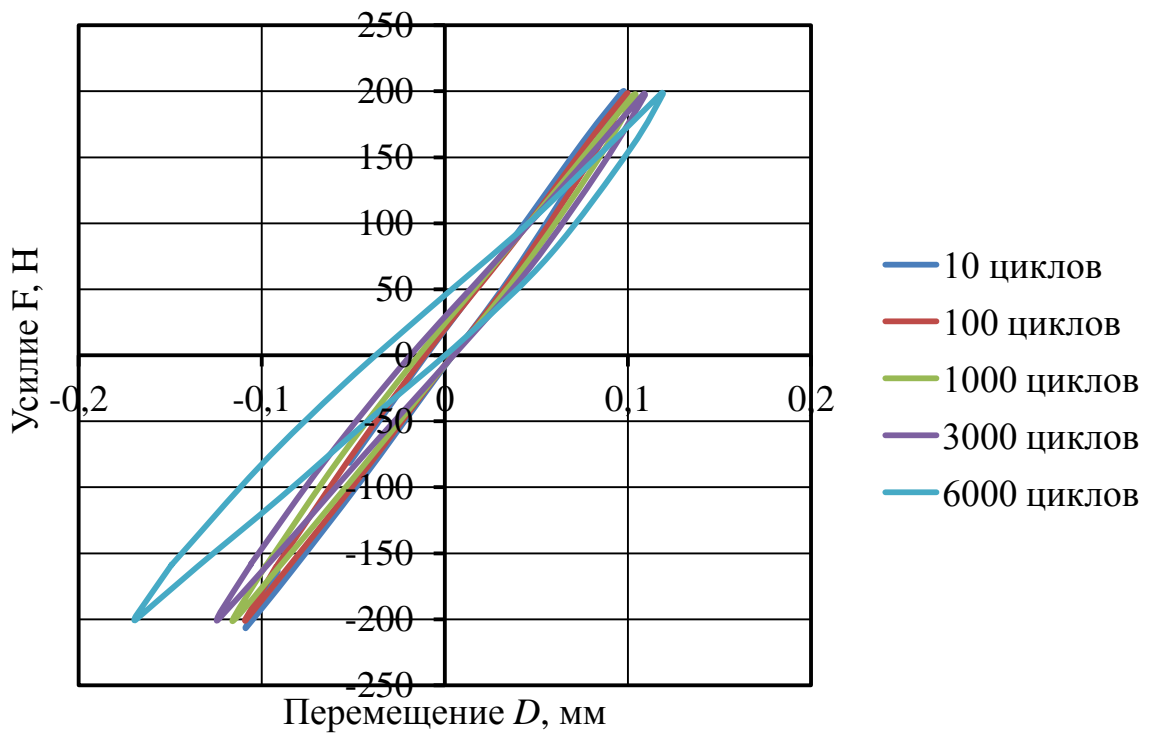


Рисунок Б.21 – Циклическая диаграмма «Усилие - перемещение» для исходного образца, нагрузка 200 Н

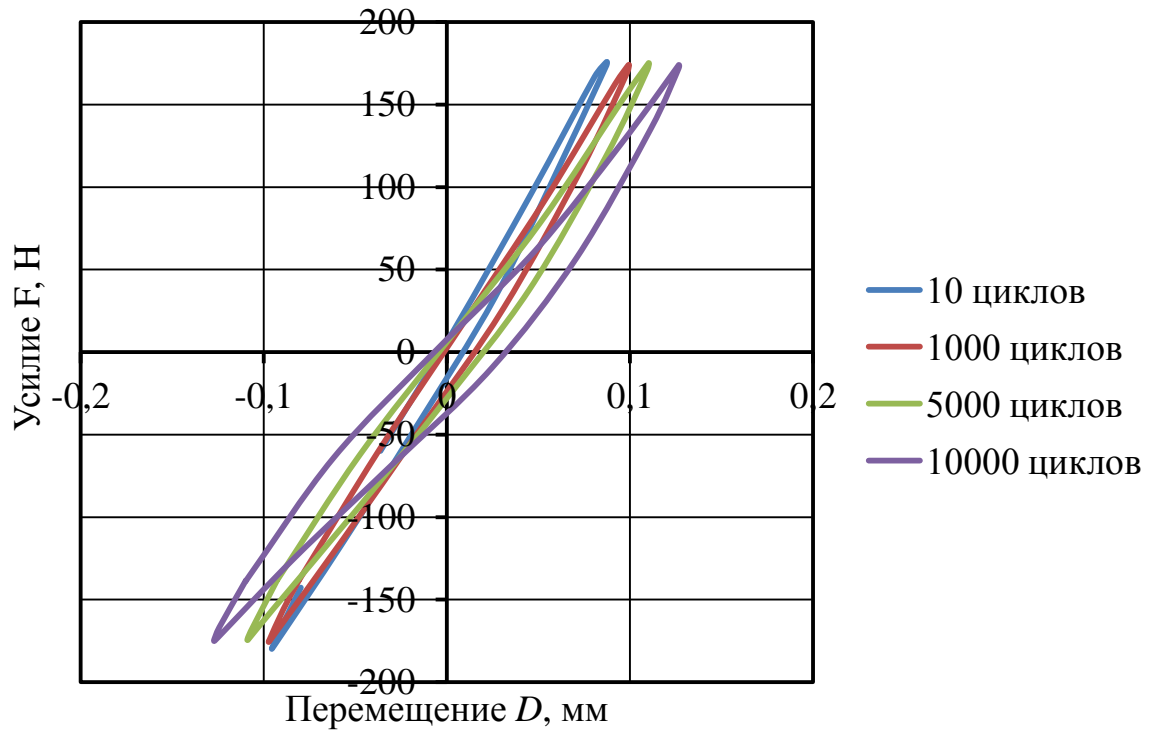


Рисунок Б.22 – Циклическая диаграмма «Усилие - перемещение» для исходного образца, нагрузка 175 Н

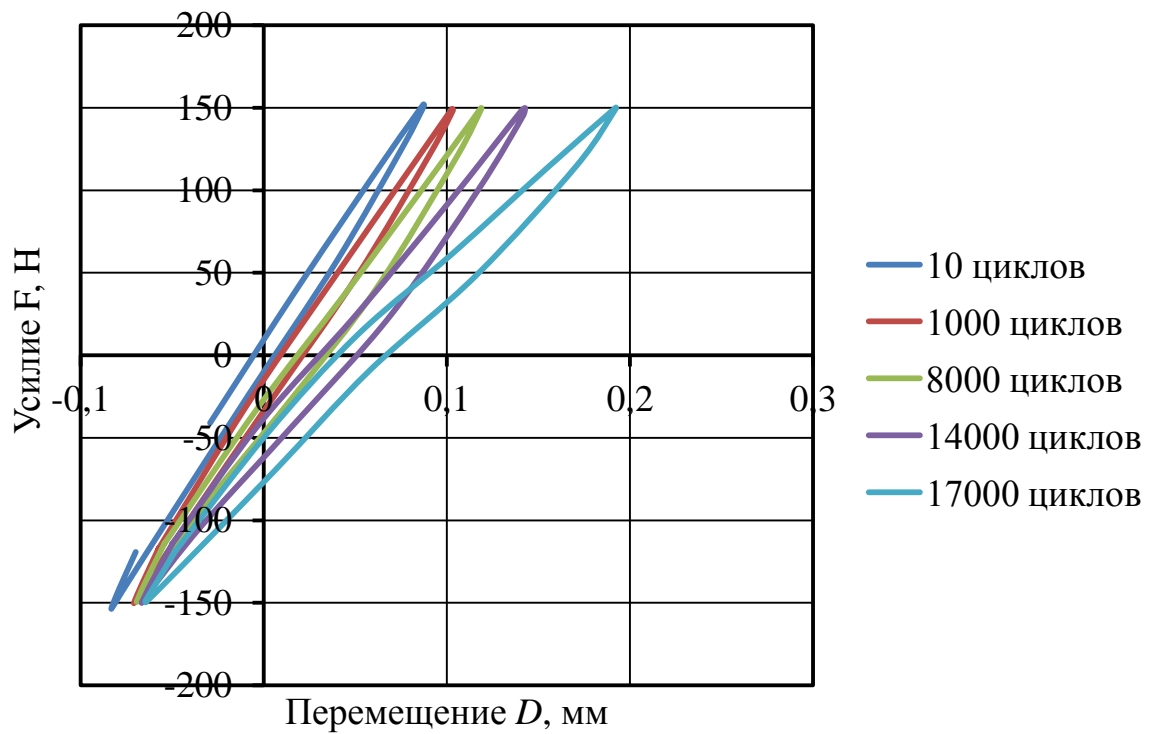
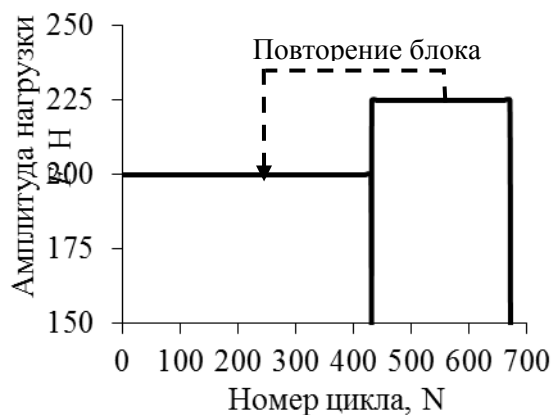


Рисунок Б.23 – Циклическая диаграмма «Усилие - перемещение» для исходного образца, нагрузка 150 Н

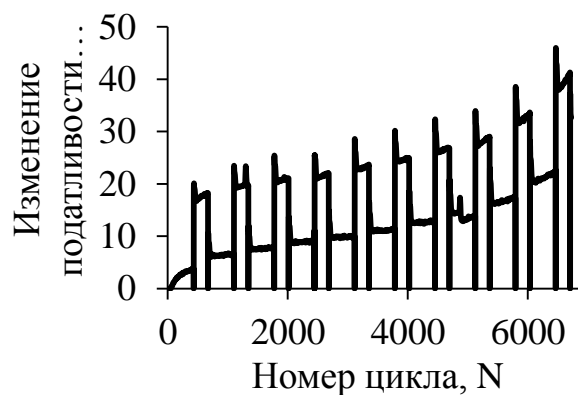
## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Исследование клеемеханических нахлесточных соединений при  
переменном циклическом нагружении

С целью исследования поведения модифицированных соединений под воздействием переменных циклических нагрузок на установке Instron Electropulse 3000 проведены соответствующие испытания при блочном нагружении. Блок состоял из 1/20 количества циклов до наступления предельного состояния при амплитуде переменной нагрузки  $F_1 = 200$  Н (430 циклов), и 1/20 количества циклов до наступления предельного состояния при амплитуде переменной нагрузки  $F_2 = 225$  Н (240 циклов) – рисунок В.1а.



а)



б)

Рисунок В.1 – Блок нагружения (а) и соответствующая диаграмма испытаний (б)

Результаты испытаний представлены на рисунке В.1б и в таблице В.1.

Таблица В.1 – Результаты циклических испытаний при блочном нагружении

Тип испытания	Амплитуда нагрузки F, Н	Среднее количества циклов до наступления предельного состояния $N_{cr}$
Постоянная амплитуда нагрузки	200	8630
	225	4830
Блочное нагружение	200, 225	6330
Гипотеза линейного суммирования относительных повреждений	200, 225	6730

По результатам циклических испытаний при блочном нагружении проведена проверка гипотезы линейного суммирования относительных повреждений:

$$\begin{cases} \omega(N, F) = \sum_i \frac{N_i}{N_{cr}(F_i)}, \\ \omega_{cr} = 1 \end{cases} \quad (B.1)$$

где  $\omega(N, F)$  – относительное повреждение;

$\omega_{cr}$  – критическое повреждение;

$F_i$  – амплитуда действующей нагрузки, Н

$N_i$  – количество циклов при амплитуде действующей нагрузки  $F_i$ ;

$N_{cr}(F_i)$  – количество циклов до наступления предельного состояния при амплитуде действующей нагрузки  $F_i$ .

Как видно из таблицы В.1, гипотеза линейного суммирования относительных повреждений показывает удовлетворительное соответствие с результатами испытаний. Таким образом, показана возможность применения гипотезы

линейного суммирования повреждений для расчета долговечности клеемеханических соединений при переменных нагрузках, которая требует дальнейших исследований.