

На правах рукописи



ГУСЕВ ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КУЗОВОВ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ИЗ СТАЛИ И АЛЮМИНИЕВЫХ
СПЛАВОВ**

Специальность 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» на базе научно-образовательного центра внедрения лазерных технологий

Научный руководитель: кандидат технических наук,
Люхтер Александр Борисович
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», директор научно-образовательного центра внедрения лазерных технологий

Официальные оппоненты: **Темис Юрий Моисеевич**
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», начальник отдела «Математическое моделирование и САПР ГТД»

Шарков Олег Васильевич
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО "Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта", профессор кафедры «Машиноведения и технических систем»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Защита диссертации состоится 10 декабря 2019 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.12 по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», <https://www.spbstu.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.



Евграфов А.Н.

ОБЩИЕ ПО АВТОРЕФЕРАТУ СОКРАЩЕНИЯ

ГУ – граничные условия; ЗТВ – зона термического влияния; КЭ – конечный элемент; КЭМ – конечно-элементная модель; МКЭ – метод конечных элементов; НДС – напряженно-деформированное состояние; ТНДС – тепловое напряженно-деформированное состояние; ТС – транспортное средство.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из наиболее активно развивающихся направлений в автомобилестроении является установка на стальной каркас в кузовах ТС листов из алюминиевых сплавов, особенно при производстве вертикальных панелей, дверей, крыльев. По данным зарубежных исследований ежегодно объемы использования алюминиевых сплавов в конструкциях ТС увеличивается на 7 %.

Увеличение доли облицовочных деталей из алюминиевых сплавов повышает сопротивление коррозии, уменьшает затраты на механическую обработку, а также снижает массу ТС. Снижение массы автомобиля сокращает эксплуатационные расходы. По данным ОК «Русал» каждые 100 кг алюминия в конструкции автомобиля экономят более 1000 л бензина на пробеге свыше 200 тыс. км, а также сокращают выбросы CO₂ на 1,5 г/км.

ТС в эксплуатации характерны нагружения с изменяющимися в случайной последовательности амплитудой и мало изменяющимися периодами нагружения. Переменное нагружение кузова силами инерции ТС при его ускорениях и торможениях представляет собой случайные последовательности, в которых при переходе от одного значения ускорения к другому изменяются параметры цикла нагружения. Это влияет на прочность элемента кузова, состоящего из стального каркаса, соединенного с решеткой из алюминиевого сплава. Поэтому обеспечение прочности соединения играет определяющее значение для обеспечения долговечности конструкции.

Для соединения листов из алюминиевых сплавов со стальными каркасами в современном производстве автобусов наиболее устойчивым способом является клеевая технология, имеющая ряд существенных недостатков. Замена клеевого соединения сваркой приводит к образованию в конструкции температурных полей с ярко выраженным перепадом, что приводит к появлению остаточных напряжений и снижению долговечности конструкции. Однако, при использовании лазерной сварки снижается тепловой поток, что приводит к снижению остаточных напряжений от неравномерного нагрева.

Поэтому проблема повышения надежности составных элементов кузова ТС, из стального каркаса и листов из алюминиевых сплавов, прогнозирование долговечности таких конструкций является актуальной задачей.

Степень ее разработанности. По результатам выполненных исследований предложена комплексная методика прогнозирования долговечности составных элементов кузовов ТС, испытывающих остаточные напряжения при соединении и инерционные нагрузки при эксплуатации, которая позволяет рассчитывать запасы прочности и расчет долговечности. Предложена формализация модифицированного эквивалентного источника теплоты при соединении листов из алюминиевых

сплавов со стальным в виде изотермической поверхности сварочной ванны с температурой плавления наиболее тугоплавкого материала. Доказана адекватность разработанных расчетных моделей МКЭ по данным экспериментальных исследований методами термометрирования. Обоснован выбор ГУ для расчета температурных полей в процессе лазерной сварки. Полученные результаты расширяют границы их применения для других видов соединений плавлением. Обладающие новизной результаты получены с использованием известных расчетных комплексов и типовых методик и испытаний. Предложена последовательность расчета долговечности составных элементов кузовов с учетом нагрузок и внутренних механических напряжений, возникающих на стадии изготовления и в процессе эксплуатации ТС.

Цели и задачи исследований. Целью диссертационной работы является разработка методики прогнозирования долговечности составных элементов кузовов ТС из стального каркаса и листов из алюминиевых сплавов.

Объект исследований – долговечность составных элементов кузовов ТС из стального каркаса и листов из алюминиевых сплавов, испытывающих остаточные напряжения при соединении и инерционные нагрузки при эксплуатации.

Предметом исследования является элемент кузова на примере крышки люка силового отсека электробуса Волгабас 5270Е.

При разработке методики прогнозирования долговечности составных элементов кузова, необходимо решить **следующие задачи**:

- выбрать тип сварки для листов из стали и алюминиевых сплавов исходя из прочности сварного соединения и остаточных напряжений;
- провести термометрирование моделей, полученных по выбранной технологии для выбора ГУ;
- определить расчетные параметры эквивалентного источника теплоты;
- провести испытания контрольных образцов, изготовленных по выбранной технологии, с целью определения прочности соединения;
- провести расчет нестационарной задачи теплопроводности на контрольных образцах;
- провести расчет ТНДС МКЭ контрольного образца для определения остаточных напряжений после сварки, используя полученные ранее значения ГУ;
- провести экспериментальную проверку полученных результатов расчета ТНДС на контрольных образцах;
- определить реальный процесс нагружения на составные элементы корпуса ТС в процессе эксплуатации;
- провести расчет МКЭ НДС составного элемента корпуса ТС по выбранной инерционной нагрузке;
- определить запас прочности в наиболее нагруженном участке составной конструкции под действием переменных нагрузок;
- провести расчет долговечности составного элемента корпуса ТС по результатам оценки его ТНДС при изготовлении, НДС в ходе эксплуатации и данных экспериментальных исследований.

Научная новизна работы заключается в:

- обосновании выбора ГУ при расчете МКЭ тепловых полей деталей при лазерной сварке;
- разработке модифицированной модели движущегося источника теплоты в виде объема сварочной ванны;
- предложенном инженерном методе определения остаточных напряжений при лазерной сварке составных элементов кузовов на основании упруго-пластического расчета ТНДС МКЭ и расчета процесса теплового нагружения при остывании;
- результатах конечно-элементного анализа ТНДС сварных соединений, НДС составных конструкций, необходимые для прогнозирования долговечности составных элементов корпуса ТС;
- комплексной методике прогнозирования долговечности составных элементов кузовов ТС, испытывающих остаточные напряжения при соединении и инерционные нагрузки при эксплуатации, которая позволяет рассчитывать запасы прочности и проводить расчет долговечности.

Практическая ценность работы:

- предложенная модель движущегося источника теплоты в виде объема сварочной ванны, методика расчета остаточных напряжений, может быть распространена на другие виды соединений плавлением;

- расчетно-экспериментальная методика определения инерционных нагрузок может быть также применена на другие конструкции и детали со схожим видом нагружения;

- разработан способ лазерной сварки внахлест листов низколегированной стали и алюминиевых сплавов (патент № 2638267).

Методология и методы исследования. В исследованиях были использованы такие численные методы расчета, как МКЭ, компьютерное моделирование в программах SolidWorks Simulation, Ansys, статистическая обработка экспериментальных данных с применением программного комплекса Mathcad.

Положения, выносимые на защиту:

- комплексная методика прогнозирования долговечности составных элементов кузовов ТС, испытывающих остаточные напряжения при соединении и инерционные нагрузки при эксплуатации;
- обоснование выбора ГУ в ходе расчетно-экспериментальных исследований при расчете МКЭ температурных полей в процессе лазерной сварки элементов кузовов ТС;
- результаты расчетно-экспериментальных исследований температурных полей и остаточных напряжений при лазерной сварке, НДС составных элементов кузовов ТС под действием инерционных нагрузок.

Степень достоверности полученных результатов.

Достоверность результатов исследования обуславливается:

- использованием законов механики, физики, современных численных методов расчета на основе математических моделей с использованием известных вычислительных программ;

- проведением экспериментальных работ на сертифицированном испытательном оборудовании, что обеспечило воспроизводимость результатов исследования;
- использование современных методик сбора и обработки исходной информации;
- сравнением авторских данных с опубликованными результатами, полученными другими авторами по рассматриваемой тематике.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по теме: «Теоретические и экспериментальные исследования комплексной технологии волоконной лазерной сварки листовых деталей из цветного и черного металлопроката для транспортных средств нового поколения» (Соглашение №14.577.21.0158 от 28.11.2014).

Апробация работы:

Основные положения диссертации обсуждались на всероссийской конференции «Инновационные проекты кооперации вузов и предприятий машиностроения: практика внедрения лазерных технологий» (г. Владимир, 2015); научно-практической конференции: «Дни науки студентов и аспирантов ВлГУ» (г. Владимир, 2016 и 2019); научно-практической конференции «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (г. Москва, 2015), III Ежегодной Всероссийской научно-практической конференции «Исследования и разработки – 2016» (г. Москва, 2016), на заседании кафедры «Строительная механика» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (г. Москва, 2019), на заседании кафедры «Станки» Московского государственного технологического университета "СТАНКИН (г. Москва, 2019).

Публикации:

По результатам выполненных исследований опубликовано 10 научных работ: 5 статей – в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций, а также 3 статьи, в журналах, индексируемых Scopus. При выполнении диссертационной работы был получен патент на способ лазерной сварки (№ 2638267).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 170 страниц текста, включая 43 иллюстрации, 19 таблиц, список литературы из 159 наименований и 7 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, указаны цель работы, задачи исследования, научная новизна, практическая ценность работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор и анализ существующих способов соединения листов из алюминиевого сплава со стальным каркасом.

Оценка долговечности деталей и конструкций, испытывающих переменные нагрузки, проанализированы в работах И.А. Биргера, А.М. Вахромеева, А.Н. Гоца, В.В. Гриба, В.П. Когаева, Дж. Коллинза, Л.А. Копельмана, С.В. Петина, В.Е. Стрижиуса, В.Т. Трощенко, О.Ф. Чернявского и др. Теория возникновения напряжений и деформаций в процессе сварки и решение связанных с ними задач теплового и теплонапряженного состояния МКЭ проанализированы в работах В.И. Алферова, В.А. Винокурова, А.Г. Григорьянца, И.В. Демьянушко, В.А. Ерофеева, А.Б. Иванченко, Д.И. Навроцкого, Г.А. Николаева, Н.О. Окерблома, В.А. Постнова, Н.Н. Рыкалина, В.М. Сагалевича, Л. Сегерлинда, В.А. Судника, Н.Д. Чайнова и др.

Проведен обзор методов расчета долговечности сварных соединений. На ТС действует большое количество режимов нагружения инерционными нагрузками и при расчете на долговечность использовалась гипотеза линейного накопления повреждений с учетом величин остаточных напряжений после изготовления.

Проанализированы методы описания движущихся источников теплоты в процессе сварки. На основании обзора работ по изготовлению и расчету составных элементов кузовов ТС из стали и алюминиевых сплавов сформулированы задачи исследования.

Во второй главе рассмотрена методика прогнозирования долговечности элементов кузовов из стального каркаса и листов из алюминиевых сплавов, нагруженных в эксплуатации инерционными силами с учетом остаточных напряжений после соединения. Последовательность расчета по предлагаемой методике представлена в виде блок-схемы на рисунке 1.

Поскольку предмет исследования имеет достаточно большие габаритные размеры, то для учета концентрации напряжений в сварном шве КЭМ должна быть достаточно громоздкой и состоять из значительного количества КЭ и узлов, что скажется на эффективности расчета. В связи с этим, а также для экспериментального определения прочности сварного соединения в работе используются контрольные образцы.

Экспериментальная отработка выбранного способа соединения стального каркаса и листов из алюминиевых сплавов проводилась на контрольных образцах. На данном этапе проводились следующие работы: исследование температурного поля при сварке с целью уточнения ГУ для расчетных исследований, изготовление микрошлифов соединений для определения геометрии сварочной ванны, исследование прочностных характеристик полученных соединений, экспериментальное определение деформаций после сварки.

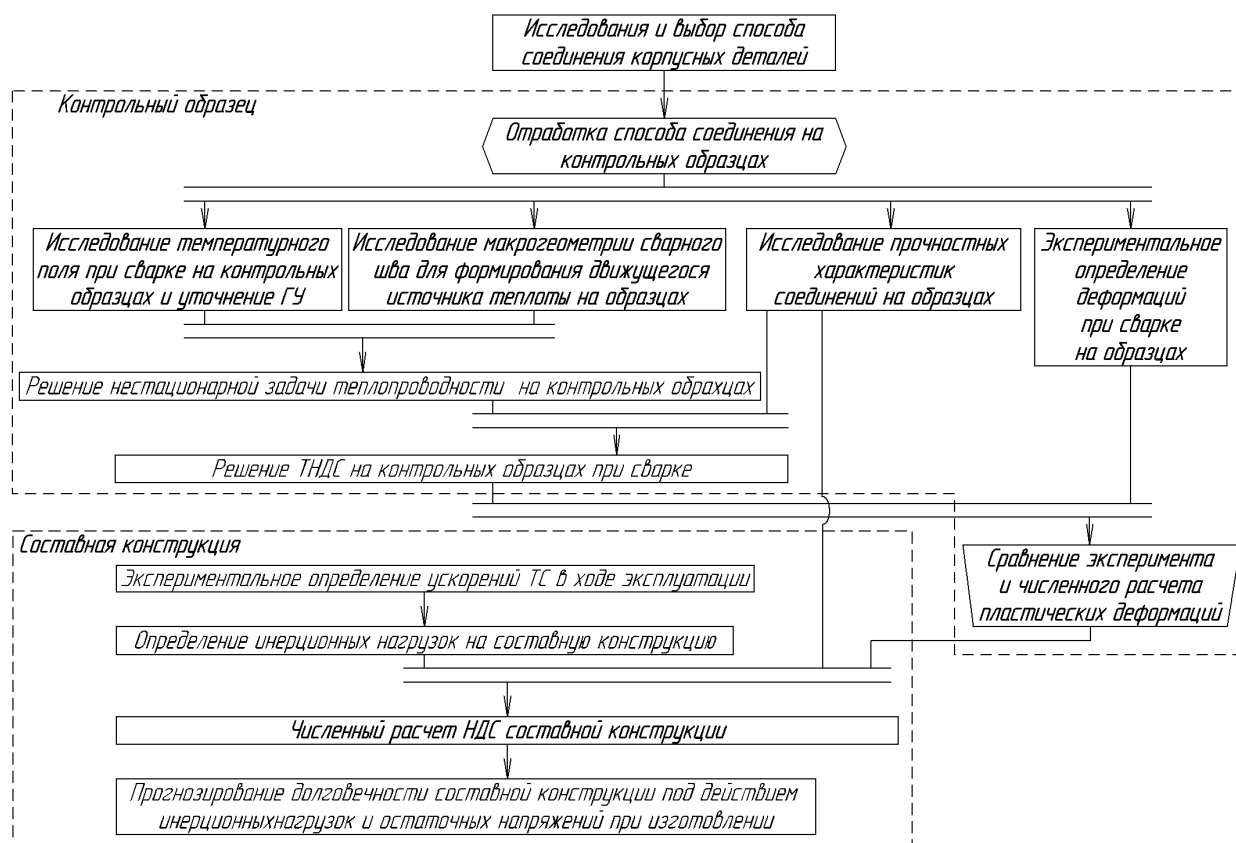


Рисунок 1 – Блок-схема методики прогнозирования долговечности составных элементов кузова

После уточнения ГУ, решается задача нестационарной теплопроводности при соединении на контрольных образцах. Также, численный расчет МКЭ ТНДС, с учетом предыдущего расчета позволил определить величины остаточных напряжений, возникающих после процесса сварки. Достоверность численного расчета МКЭ деформаций контрольного образца после соединения подтверждаются результатами экспериментальных исследований.

Величины остаточных напряжений при расчете ТНДС контрольного образца могут быть применены только после проверки с расчетами ТНДС на участке реальной конструкции. При расчете НДС предмета исследований используются инерционные нагрузки, получаемые после экспериментального определения ускорений ТС в условиях эксплуатации.

По результатам численных расчетов МКЭ проводится расчет долговечности по гипотезе Кортена-Долана.

Для определения прочности соединений и уточнения ГУ в качестве предмета исследования принят контрольный образец (см. рисунок 2), полученный лазерной сваркой по разработанному автором в составе коллектива способу. Контрольный образец состоит из соединенных четырьмя швами (прямолинейными или кольцевыми) двух стальных и двух алюминиевых пластин. Длина рабочей части образца составляет $l_0=120$ мм, ширина рабочей части образца $b=30\pm 0,5$ мм, согласно ГОСТ 6996-66.

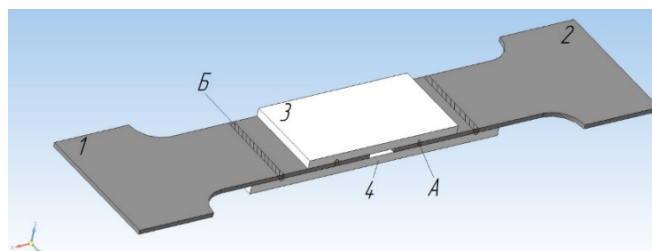


Рисунок 2 – Контрольный образец: 1 и 2 – листы стали 20, 3 и 4 – листы из алюминиевого сплава АМг2М, А и Б – места соединений

Модель сварочной ванны, представленная на рисунке 3б, соответствует поперечному сечению шва на микрошлифе соединения (рисунок 3а).

Расчет температурных полей свариваемых образцов основывается на решении уравнения нестационарной теплопроводности, для заданных начальных и граничных условий теплообмена.

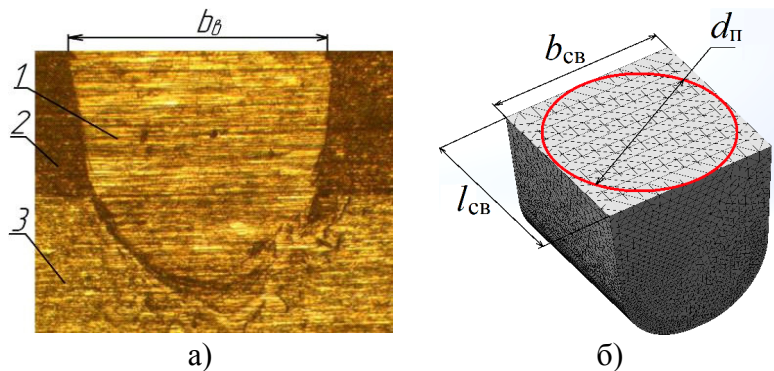


Рисунок 3 – Модель сварочной ванны:

- а – микрошлиф поперечного сечения соединения: 1 – сварной шов; 2 – сталь 20; 3 – алюминиевый сплав АМг2М;
- б – модель сварочной ванны: $b_{св}$ – ширина сварочной ванны, $d_{п}$ – диаметр пятна лазерного излучения

Объем сварочной ванны расплавленного под воздействием лазерного луча металла существует в течение времени $\tau_{св}$, определяемого как $\tau_{св} = l_{в} / v_{св}$. Здесь $l_{в} = b_{в}$ – длина сварочной ванны; $v_{св}$ – скорость перемещения сварочной головки. В сварочной ванне расплавленный металл перемешивается, и температура такого расплава принимается равной температуре плавления стали.

Такая формализация источника теплоты упрощает задание ГУ теплообмена в процессе сварки. На рисунке 4 схематично представлено перемещение источника теплоты и изменение температуры в следующих объемах сварочной ванны по направлению сварки.

В момент времени τ_i температура в объеме ванны 1 мгновенно повышается до температуры плавления стали. В течение времени $\tau_{св}$ осуществляется перенос теплоты от сварочной ванны 1 через ее граничные поверхности А, И, Ж в металл заготовки. По завершению времени $\tau_i + \tau_{св}$ в качестве источника теплоты выступает последовательно следующий 2 и другие объемы сварочной ванны по направлению сварки с аналогичным интервалом времени $\tau_{св}$ и граничными поверхностями. Охлаждение сварного шва и образца при перемещении источника теплоты и остывание после окончания сварки осуществляется путем передачи тепла в металл образца и свободной конвекции в окружающую среду.

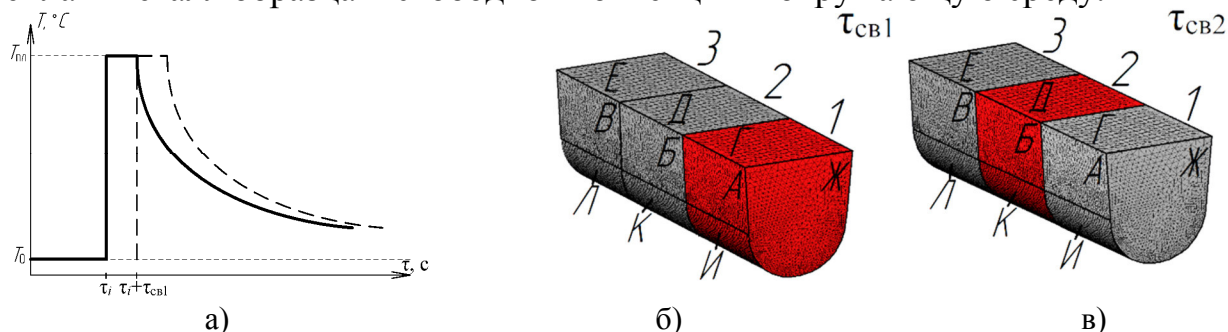


Рисунок 4 – Схема задания начальных и граничных условий теплообмена от сварочной ванны:

- а – расчетное изменение температур для сварочных ванн в момент времени τ_i и $\tau_i + \tau_{св}$;
- б – схема для шага расчета $\tau_{св1}$; в – схема для шага расчета $\tau_{св2}$;

буквами обозначены поверхности, контактирующие с листами из стали (А, Б, В) и алюминиевого сплава (И, К, Л), окружающей средой (Г, Д, Е) и соседней сварочной ванной (Ж); 1, 2, 3 – сварочные ванны в порядке, соответствующие перемещению сварочной головки

Полученные значения температур на стадии остывания используются при анализе ТНДС исследуемых контрольных образцов МКЭ в упругопластической постановке. Решение в упругопластической постановке при использовании МКЭ осуществляется методом переменных параметров упругости.

Расчет сводится к определению полей перемещений и тем самым связь с минимизацией потенциальной энергии системы при отыскании узловых значений вектора перемещений, используя следующую систему линейных уравнений:

$$\{K\}\{V\} = \{\Omega\}, \quad (1)$$

где $\{K\}$ – матрица жесткости; $\{V\}$ – вектор узловых перемещений; $\{\Omega\}$ – вектор узловых нагрузок.

Численное решение ТНДС в упругопластической постановке решается системой уравнений типа (1). Расчет проводится для каждого «временного» шага, пока разность в расчетных точках не станет меньше заданной малой величины.

Конструкционную прочность и пластичность алюминиевые сплавы приобретают при температурах ниже 300 °С, при которой и могут формироваться остаточные напряжения.

В связи с этим остаточные напряжения в зоне термического влияния листов из алюминиевых сплавов для контрольных образцов предлагается определять следующим приближенным образом.

При решении уравнений нестационарной теплопроводности использовалась модифицированная модель сварочной ванны, что позволило найти расчетное температурное поле, а при решении задачи МКЭ ТНДС в соединении – величину остаточных напряжений после остывания до 300 °С.

При расчете использовался метод переменных параметров упругости И.А. Биргера для расчетного температурного поля в упругопластической постановке с использованием характеристики материалов для принятой в расчете температуры. Расчет ТНДС контрольных образцов проводился с использованием программы Solidworks Simulation (Solidworks© Education Edition, серийный номер 9710 0114 7704 7276) с использованием критерия пластичности Мизеса.

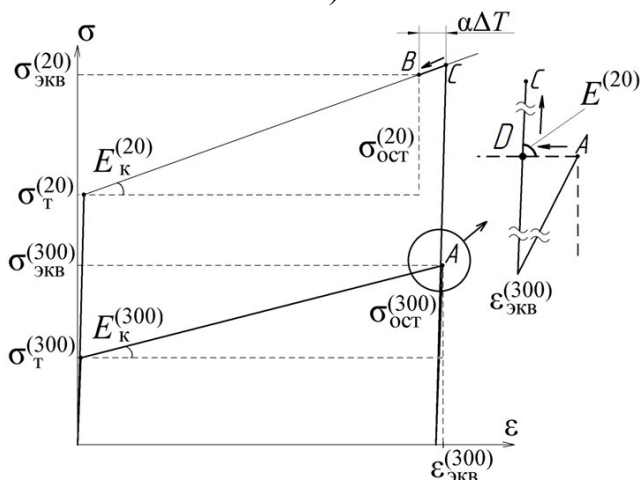


Рисунок 5 – К определению пластических деформаций на стадии остывания

Расчет процесса теплового нагружения при остывании (ломаная линия ACB , рисунок 5) проводим используя кривые деформирования контрольных образцов при растяжении при температура 300 °С и 20 °С. При этом при температура 300 °С контрольный образец удлиняется, а при остывании до 20 °С – укорачивается.

Остаточные напряжения после остывания определяются по формуле:

$$\sigma_{ост}^{(20)} = \sigma_{ост}^{(300)} + (E_k^{(20)} - E_k^{(300)}) \cdot \epsilon_{ЭКВ}^{(300)} - \alpha \cdot \Delta T \cdot E_k^{(20)} \quad (2)$$

При расчете МКЭ НДС составных элементов кузовов ТС нагруженных силами инерции в правую часть уравнения типа (1) добавить вектор инерционных

нагрузок $\{\overline{M}\}\{\overline{j}(t)\}$ где $\{\overline{M}\}$ – матрица масс всей упругой конструкции в общей системе координат; $\{\overline{j}(t)\}$ – вектор ускорений, действующий на КЭ системы.

Матрицу масс КЭ можно определить по формуле

$$\{\overline{M}\} = \iiint_V \{C\}^T \{m\} \{C\} dx dy dz \quad (3)$$

где

$$\{m\} = \begin{Bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{Bmatrix};$$

m – масса КЭ; $[C]$ – матрица, связывающая компоненты перемещений для произвольной точки КЭ с узловыми перемещениями.

С учетом рельефа дороги ТС перемещается, увеличивая скорость на некоторых участках движения и снижая скорость при остановке. Тем самым на ТС действуют переменные инерционные нагрузки. От нагружения переменными силами в сечениях максимальных напряжений (это как раз могут быть сварные швы) возникают макротрещины, которые прогрессивно развиваясь, могут привести к разрушению соединения. Инерционные нагрузки на элементы кузовов ТС следует отнести к случайным.

Примем для расчета эквивалентных напряжений в расчетной точке конструкции при действии минимальной и максимальной нагрузок зависимость, предложенную И.А. Биргером:

$$\sigma_{ae} = \frac{K_\sigma}{\varepsilon_\sigma \cdot \beta_\sigma} \sigma_{ia} + \psi_\sigma \cdot (\sigma_{1m} + \sigma_{ост.}), \quad (4)$$

где K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений, $K_\sigma=1$; $\varepsilon_\sigma=1$ – масштабный коэффициент; $\beta_\sigma=0,98$ – коэффициент поверхностной чувствительности; σ_{ia} – интенсивность амплитуд переменных напряжений цикла:

$$\sigma_{ia} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xa} - \sigma_{ya})^2 + (\sigma_{ya} - \sigma_{za})^2 + (\sigma_{za} - \sigma_{xa})^2 + 6(\tau_{xya}^2 + \tau_{yza}^2 + \tau_{zxa}^2)} \quad (5)$$

σ_{xa} , σ_{ya} , σ_{za} , τ_{xya} , τ_{zxa} , τ_{yza} – амплитуды переменных напряжений цикла, вычисленные после расчета МКЭ под действием максимальной и минимальной нагрузок; $\psi_\sigma=0,35$ – коэффициент, учитывающий влияние среднего напряжения на предел выносливости; σ_{1m} – главное напряжение при расчете МКЭ.

Вклад величины остаточных напряжений в усталостную долговечность учитывается путем добавления их к главному напряжению цикла.

Оценка долговечности проводится на основе гипотезы Кортена-Долана.

$$(N_g)_f = \frac{N_1}{\alpha_1 + \alpha_2 (\sigma_2/\sigma_1)^d + \alpha_3 (\sigma_3/\sigma_1)^d + \dots + \alpha_n (\sigma_n/\sigma_1)^d}, \quad (6)$$

где $(N_g)_f$ – общее число циклов до разрушения в условиях действия напряжений с изменяющейся амплитудой; d – постоянная материала (для алюминиевого сплава $d_{ср.ал.}=6$); N_1 – число циклов до разрушения при действии напряжений с наибольшей амплитудой σ_1 ($N_1=100000$, для малоциклового нагружения); $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – относительные доли числа циклов нагружений с амплитудами $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$, соответственно.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям над контрольными образцами (см. рисунок 2), для получения исходных данных при расчете долговечности предмета исследований.

В качестве источника теплоты в экспериментах использовалось излучение иттербиевого волоконного лазера. Сварка осуществлялась на лазерном роботизированном комплексе ЛРК-С в составе: шестиосевой робот Fanuc M710iC-50, сварочная головка IPG FLW D50, иттербиевый волоконный лазер ЛС-3 мощностью 3 кВт.

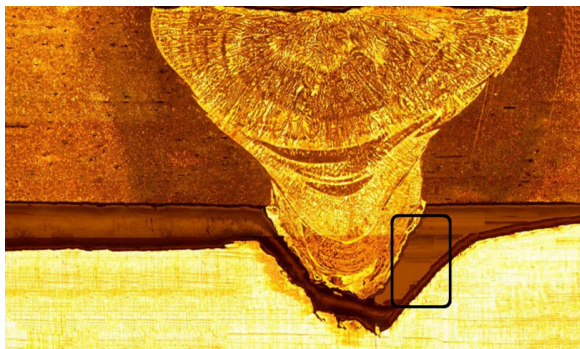


Рисунок 6 – Разрушение соединения путем смятия алюминиевого сплава стальным стержнем

Экспериментальные исследования на статическую прочность сварных соединений проводились по ГОСТ 6996-66 для серии из пяти контрольных образцов на разрывной машине WDW-100E. Разрушение контрольных образцов, показавших наибольшее временное сопротивление, происходило из-за смятия от нормальных напряжений. Временное сопротивление сварных соединений от временного сопротивления листа алюминиевого сплава составило: для прямолинейных швов –90 %, а для кольцевых –94 %.

Для обоснования выбора ГУ при расчете теплового состояния МКЭ проведено термометрирование контрольных образцов.

Измерения геометрии сварочных ванн проводились при помощи инструментов программного обеспечения JMicroVision по снимкам, сделанными на поперечных шлифах.

Измерение деформаций в процессе формирования соединения проводилось на наружной поверхности листа алюминиевого сплава (см. рисунок 7). Изменение деформации в процессе сварки, на стадии остывания для прямолинейного шва приведены на рисунке 8. Знак «минус» соответствует сжатию контрольного образца в месте измерения. По завершению эксперимента величины остаточных поперечных деформаций составили -0,000075 и -0,00005 для прямолинейного и кольцевого швов соответственно.

На графике также нанесено значение деформации данного участка контрольного образца, полученные численным расчетом МКЭ. Относительная погрешность между значениями численного расчета и эксперимента не превышает 10%, что принятые при расчете МКЭ ГУ и допущения корректны, а также позволяет использовать полученные величины деформаций в наиболее нагруженных участках при расчете долговечности.



Рисунок 7 – Экспериментальное определение деформаций: 1 – стальной лист Ст20, 2 – лист из алюминиевого сплава АМг2М; 3 – тензомер Гугенбергера; 4 – сварное соединение

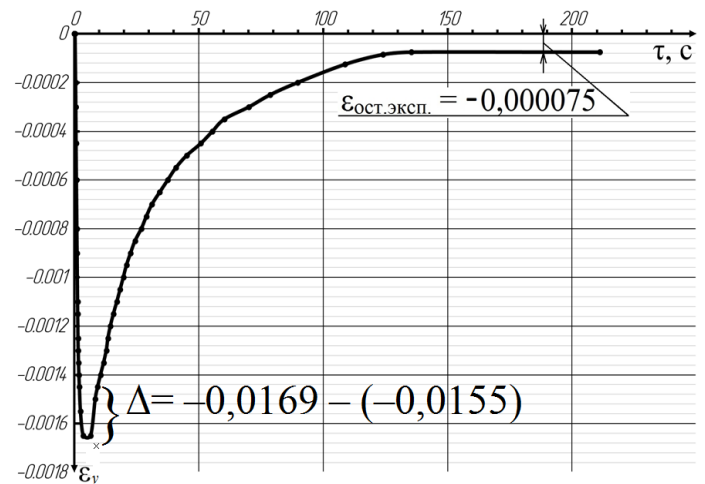


Рисунок 8 – Распределение деформаций в процессе и после лазерной сварки для прямолинейного шва ($P=3000$ Вт, $v = 18$ мм/с), «x» отмечен результат численного расчета

Изменение температуры в контрольных точках срединной плоскости ($l_{св}=15$ мм от начала соединения) контрольного образца от времени и сравнение с численным расчетом показано на рисунке 9.

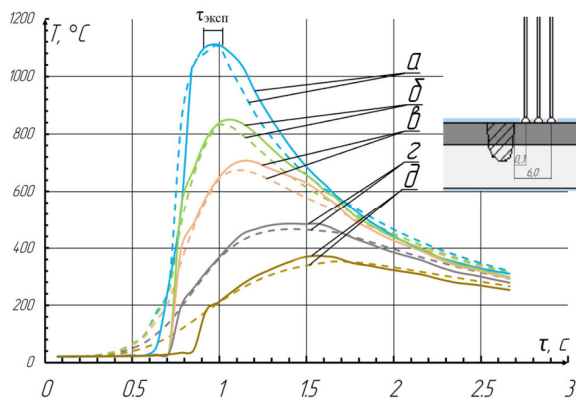


Рисунок 9 – Сравнение результатов термометрирования с численным расчетом, где «—» – данные эксперимента, «---» – результаты расчета: а – 0,3 мм от шва, б – 1,0 мм от шва, в – 1,7 мм от шва, г – 3,5 мм от шва, д – 6,0 мм от шва

температура в месте измерения падает с 1109°C до 442°C).

Результаты расчета температурных полей МКЭ хорошо согласуются с результатами термометрирования. Значительные отклонения имеются только на участке нагрева, в момент выхода работы термопар на рабочий диапазон температур. Относительная погрешность между значениями численного расчета и эксперимента для одинаковых моментов времени на интервале сварки и охлаждения не превышает 7%, что свидетельствует о корректности выбора ГУ и приемлемости принятых при расчете допущений. Суммарная относительная погрешность измерения температур с использованием хромель-алюмелевых термопар и используемого измерительного оборудования составила 2,2%.

Предмет исследований выполнен из стальных пустотелых профилей прямоугольного сечения в виде рамы. На раме путем лазерной сварки по выбранной

технологии, установлены пластины из тонкой листовой стали, к которым прямолинейными и кольцевыми швами присоединена перфорированная пластина из алюминиевого сплава марки АМГ2М. Крышка прикреплена к кузову ТС с помощью двух петель и двух замков к стенке кузова. Полная масса крышки составляет 27,62 кг при массе алюминиевой панели 10,28 кг.

Ускорение кузова определялось обработкой опытных данных, полученных при движении автобуса по маршруту общественного транспорта г. Владимир со следующими характеристиками: тип дорожного покрытия – асфальтобетонный, протяженность – 13,36 км, количество промежуточных остановок – 27, часы «пик» на данном маршруте с 7 до 9 часов утром и с 19 до 20 часов вечером, появление детей на проезжей части не предполагается, количество зарегистрированных маршрутов – 8.

Регистрация ускорений кузова, возникающего при разгоне и торможении ТС выполнялась с помощью акселерометра в видеорегистраторе, а обработка результатов – встроенным программным обеспечением.

На рисунке 10 приведены зарегистрированные данные в ходе эксплуатации: скорость ТС, изменение ускорений по трем осям (ось X в ходе эксперимента соответствовала направлению движения). Время регистрации показаний составило ~8 часов.

Действительный процесс изменения ускорения ТС (см. рисунок 10, график j_x) был заменен схематизированным по методу полных циклов (ГОСТ 25.101–83).

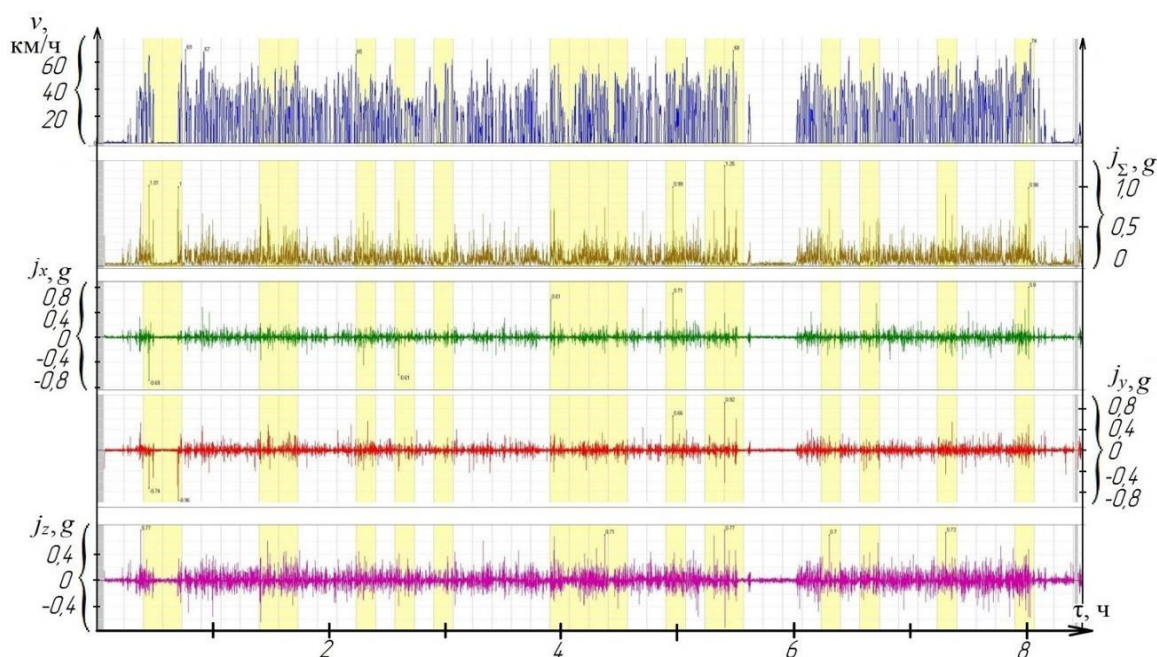


Рисунок 10 – Параметры движения ТС в ходе эксплуатации (сверху вниз): скорость, модуль вектора ускорения, проекции ускорения по осям X , Y , Z (ось X соответствует направлению движения)

После обработки действительного процесса ускорения ТС оказалось, что величина ускорения автобуса изменяется в пределах от 0,5·g до -0,5 g. Результаты обработки одного цикла приведены на рисунке 11.

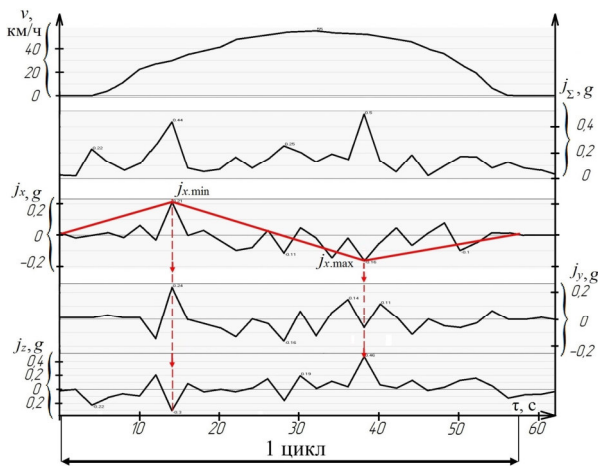
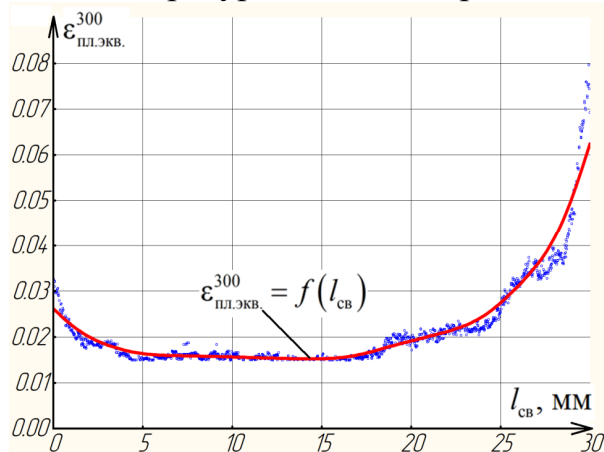
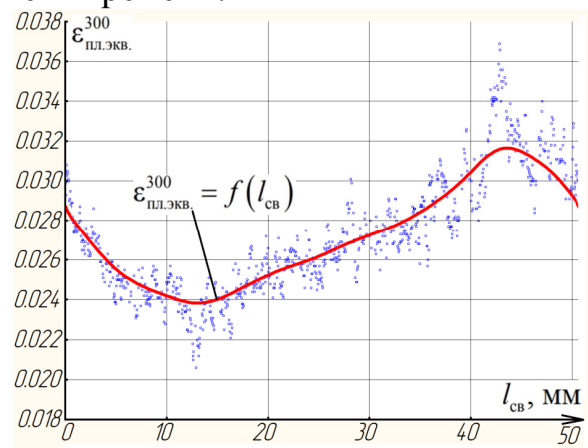


Рисунок 11 – Результаты обработки записи скорости и ускорения ТС для случайного цикла нагружений на примере ускорения по оси X, сверху вниз приведены: скорость, модуль вектора ускорения, проекции ускорения по осям X (по направлению движения), Y (перпендикулярно предмету исследований), Z (перпендикулярной плоскости движения)

составляющая эквивалентных деформаций значительно повышается и достигает величины $\epsilon_{\text{пл.экв.}}^{300} = 0,0797$, для кольцевого шва значения пластической деформации не превышают $\epsilon_{\text{пл.экв.}}^{300} = 0,0369$. Данные результаты подтверждаются распределением температурных полей в расчетный момент времени.



а)



б)

Рисунок 12 – Распределение пластической составляющей эквивалентных деформаций $\epsilon_{\text{пл.экв.}}^{300}$ в ЗТВ листа алюминиевого сплава в наиболее нагруженном участке по длине $l_{\text{св}}$: а – прямолинейного; б – кольцевого сварных швов

Подставив в формулу (2) известные и справочные величины, остаточные напряжения в ЗТВ листа алюминиевого сплава для прямолинейного сварного шва составили 48,85 МПа, для кольцевого шва – 20,38 МПа.

При решении задачи ТНДС на участке конструкции было получено количественное и качественное совпадение результатов, что позволило перенести полученные результаты расчета остаточных напряжений, полученных на контрольных образцах на реальную конструкцию.

В четвертой главе представлены результаты численной реализации методики расчета ТНДС предмета исследований от инерционных нагрузок возникающих в ходе эксплуатации и прогнозирование его долговечности с учетом остаточных напряжений после сварки.

Результаты решения задачи ТНДС контрольного образца из листов стали и алюминиевого сплава в наиболее опасном участке (см. рисунок 6) приведены на рисунке 12, где по оси ординат показана пластическая составляющая эквивалентных деформаций $\epsilon_{\text{пл.экв.}}^{300}$, а по оси ординат – длина соединения $l_{\text{св}}$.

Для прямолинейного шва в месте завершения соединения пластическая

Расчет напряженного состояния предмета исследований осуществляется с помощью лицензионного программного обеспечения ANSYS (клиентский номер 622469). Трехмерная КЭМ предмета исследований состоит из 579359 узлов и 1250094 КЭ. Размер КЭ в зоне сварного шва составляет 1 мм, для остальной модели – 3 мм. Механические характеристики соответствовали справочным, а для швов использовались экспериментально полученные в главе 3 данные.

Результаты численного расчета МКЭ эквивалентных напряжений от действия сил инерции представлены на рисунке 13. Максимальные напряжения возникают в сварных швах решетки, близко расположенных у мест установки замка крышки (рисунок 13). При этом у прямолинейных швов по сравнению с кольцевыми швами они заметно выше: 7...10 МПа против 4...5 МПа при равном удалении от места крепления. Однако использование прямолинейных швов в этих местах обусловлено конструктивными особенностями крышки.

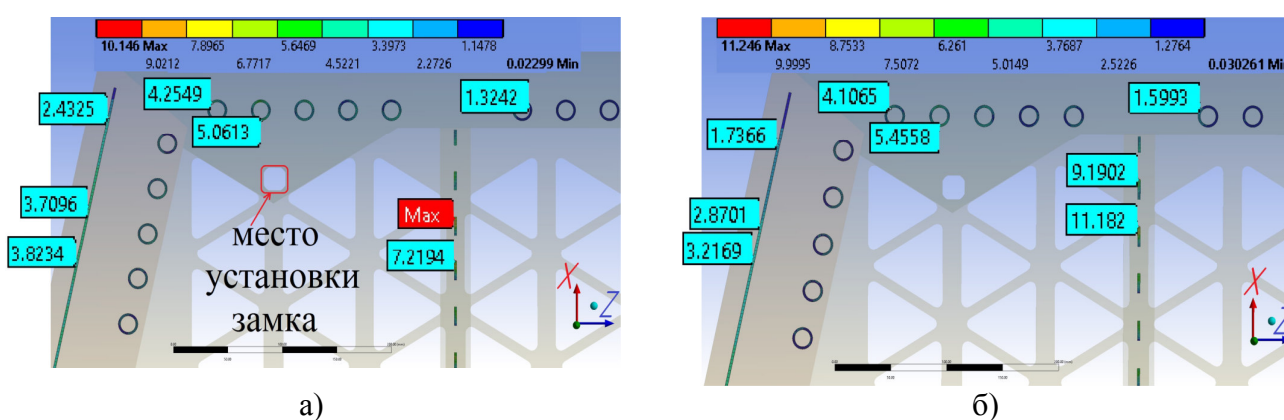


Рисунок 13 – Эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$, МПа на участке конструкции от действия ускорений в плоскости перпендикулярной поверхности крышки люка ТС:
 а – при ускорении $j_y = -0,5 \cdot g$, «Max» соответствует напряжению 10,146 МПа;
 б – при ускорении $j_y = 0,5 \cdot g$, «Max» соответствует напряжению 11,246 МПа,
 в прямоугольниках указаны эквивалентные напряжения в выделенных КЭ

Результаты расчета запасов прочности n_σ крышки смотрового люка отсека силовой установки Волгабас 5270Е представлены в таблице 1, из которой следует, что для наиболее нагруженного цикла $n_\sigma = 1,451$. Однако относительные доли числа циклов нагружений с амплитудами, при которых $n_\sigma < 1,5$ невелико. Долговечность крышки люка силового отсека, рассчитанная по формуле (6) с учетом остаточных напряжений составила 2,65 млн. циклов, что соответствует 16,6 года эксплуатации при сроке службы автобусов в 7 лет.

По результатам анализа расчетных исследований МКЭ можно сделать вывод о том, что на долговечность составных элементов кузовов из стального каркаса и листов из алюминиевых сплавов остаточные напряжения вносят значительный вклад в ресурс транспортного средства, что предъявляет высокие требования к технологии изготовления и конструированию данных конструкций.

Таблица 1 – Результаты расчета запасов прочности при переменных напряжения

Группа циклов	$j_{y.min}$ g, М/с ²	$j_{y.max}$ g, М/с ²	σ_{ia} , МПа	σ_{1m} , МПа	σ_{ae} , МПа	α	n_{σ}
1	0,0	0,1	0,6556	2,0844	18,49	0,0034	2,252
2	-0,1	0,1	1,9037	2,0844	19,77	0,2685	2,107
3	-0,2	0,1	2,9439	2,0844	20,83	0,1174	2,000
4	-0,3	0,1	4,0010	2,0844	21,91	0,0470	1,901
5	-0,4	0,1	5,0587	2,0844	22,99	0,0134	1,812
6	-0,5	0,1	5,9495	2,0844	23,90	0,0034	1,743
7	0,0	0,2	1,7781	4,3378	20,43	0,0034	2,039
8	-0,1	0,2	2,7785	4,3378	21,45	0,1779	1,942
9	-0,2	0,2	3,8149	4,3378	22,51	0,1309	1,851
10	-0,3	0,2	4,9228	4,3378	23,64	0,0268	1,762
11	-0,4	0,2	5,9335	4,3378	24,67	0,0336	1,689
12	0,0	0,3	2,5689	6,5925	22,02	0,0034	1,891
13	-0,1	0,3	3,6736	6,5925	23,15	0,0436	1,799
14	-0,2	0,3	4,6646	6,5925	24,16	0,0436	1,724
15	-0,3	0,3	5,7081	6,5925	25,23	0,0268	1,651
16	-0,4	0,3	6,6991	6,5925	26,24	0,0067	1,588
17	-0,1	0,4	4,5526	8,8482	24,84	0,0168	1,677
18	-0,2	0,4	5,6114	8,8482	25,92	0,0067	1,607
19	-0,3	0,4	6,7088	8,8482	27,04	0,0067	1,541
20	-0,1	0,5	5,5128	11,1037	26,61	0,0101	1,566
21	-0,3	0,5	7,5689	11,1037	28,71	0,0101	1,451

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе на основе проведенных исследований и выполненных разработок получены следующие результаты.

1. На основе анализа экспериментальных и теоретических исследований по способам соединений и расчету составных элементов кузовов ТС разработана комплексная методика прогнозирования долговечности, в основу которой положены оценка НДС конструкции под действием инерционных нагрузок в эксплуатации с учетом ТНДС при сборке.

2. Предложены новые адекватные модели для формализации источника теплоты в процессе изготовления элементов конструкций ТС из листов стали и алюминиевых сплавов внахлест, выявлены условия теплообмена, которые позволили корректно задать начальные и граничные условия при численном решении МКЭ уравнения нестационарной теплопроводности и обеспечили удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных. Результаты термометрирования соединяемых деталей показали, что максимальное отличие между температурами, измеренными на контрольных образцах и полученными расчетным путем составляют не более 7%.

3. Определена прочность сварных соединений, на специальных контрольных образцах, состоящих из листов стали и алюминиевых сплавов. По результатам обработки экспериментальных исследований прочность соединений, выполненных прямолинейным швом уступает прочности основного материала алюминия не более чем на 10%, для кольцевого шва – не более 6%.

4. На основании конечно-элементного анализа упруго-пластического НДС соединений численно определены величины остаточных напряжений в прямолинейных и кольцевых соединениях листов из стали и алюминиевого сплава после сварки. В прямолинейном шве они составили 48,85 МПа, для кольцевого шва –

20,38 МПа. Относительная погрешность значений деформаций численного расчета и эксперимента не превышает 10%, что свидетельствует, что принятые при расчете МКЭ ТНДС ГУ и допущения корректны.

5. На основе разработанной методики определены ускорения ТС в эксплуатации и инерционные нагрузки на составные элементы кузова. В схематизированных циклах расчет проводился при ускорениях от $-0,5 \cdot g$ до $+0,5 \cdot g$, которые формируют 21 тип цикла нагружения.

6. На основе конечно-элементного анализа НДС проведен расчет на прочность и долговечность составного элемента кузовов из стали и алюминиевого сплава под действием переменных инерционных нагрузок. Запас прочности при переменных напряжениях наиболее нагруженного участка крышки люка силового отсека с учетом остаточных напряжений составил 1,451, а расчетная долговечность – 16,66 года.

7. Материалы диссертации переданы в ООО «БМГ» (Владимир) для применения при проектировании элементов кузовов из стали и алюминия для автобусов с электрической тягой, а также использованы в учебном процессе (курс «Использование метода конечных элементов в энергомашиностроении»).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций:

1. **Гоц, А.Н.** Расчет температурных полей в процессе лазерной сварки стальных и алюминиевых листов внахлест / А.Н. Гоц, Д.С. Гусев, В.Ф. Гуськов, А.Б. Люхтер // Современные наукоемкие технологии, 2019. – № 2. – С. 32-37. – Библиогр. с. 37. – ISSN 1812-7320.

2. **Гоц, А.Н.** Расчет на прочность элементов кузовов автобусов от действия инерционных нагрузок / А.Н. Гоц, Д.С. Гусев, В.Ф. Гуськов, А.Б. Люхтер // Современные наукоемкие технологии, 2019. – № 6. – С. 39-44. – Библиогр. с. 44. – ISSN 1812-7320.

3. **Гоц, А.Н.** Методика расчета на долговечность составных элементов кузовов транспортных средств из стали и алюминиевых сплавов / А.Н. Гоц, Д.С. Гусев, В.Ф. Гуськов, А.Б. Люхтер // Современные наукоемкие технологии, 2019. – № 9. С. 64-69. – Библиогр. с. 69. – ISSN 1812-7320.

4. **Гоц, А.Н.** Экспериментальное исследование прочности составных элементов кузовов транспортных средств из стали и алюминиевых сплавов / А.Н. Гоц, Д.С. Гусев, А.Б. Люхтер // Современные наукоемкие технологии, 2019. – № 10. – ISSN 1812-7320.

5. **Гусев, Д.С.** Выбор технологических режимов лазерной сварки внахлест листов алюминиевого сплава АМг2М со сталью Ст3 с использованием регрессионного анализа / Успехи современной науки, 2017. – Т. 1. – № 12. – С. 88-94. – Библиогр. с.93-94. – ISSN: 2587-7380.

6. **Люхтер, А.Б.** Исследование процесса формирования сварного соединения, полученного лазерной сваркой внахлест алюминия АМг2М и стали Ст3 / А.Б. Люхтер, А.Н. Шлегель, Д.С. Гусев, С.С. Самарин // Материаловедение, Изд-

во: ООО «Наука и технологии», 2018. – №. 1. – С. 26-30. – Библиогр. с. 30. – ISSN: 1684-579X.

Статьи в журналах, индексируемые в Scopus

7. **Shlegel, A.N.** Modeling of butt and lap joint laser welding of aluminum alloys and constructional steel sheets / A.N. Shlegel, N.N. Evtikheev, D.S. Gusev and A.B. Ivanchenko // *Non-ferrous Metals*. – 2016. –No. 1 (40). – P.27-32. – Refer.: p. 32. – ISSN: 2072-0907.

8. **Lukchter, A.B.** Study of Formation of Welded Joint Produced by Laser Overlap Welding of Aluminum AMg2M Alloy and St3 Steel / A.B. Lukchter, A.N. Shlegel, D.S. Gusev // *Inorganic materials: applied research*, Pleiades Publishing, Ltd., 2018. – Vol. 9. – № 4. – PP. 709-713. – Refer.: p.713. – ISSN: 2075-1133.

9. **Люхтер, А.Б.** Результаты механических испытаний корпусных элементов автобусов, полученных лазерной сваркой стального профиля Ст3 с алюминиевой облицовкой АМг2М / А.Б. Люхтер, А.Н. Шлегель, А.А. Леонтьев, Д.С. Гусев // *Цветные металлы*, 2017. – № 10. – С. 85-89. – Библиогр. с. 89. – ISSN 0372-2929

Прочие публикации:

10. **Способ лазерной сварки** внахлест листов конструкционной стали и сплавов алюминия [Текст]: патент на изобретение № 2638267. Шлегель А.Н., Люхтер А.Б., Кононов В.А., Валуйских В.П., Гусев Д.С.; патентообладатель ВлГУ; ; заявл. 09.01.2017; опубл. 12.12.2017; приоритет 09.01.2017

11. **Люхтер, А.Б.** Результаты исследования волоконной лазерной сварки листовых деталей из цветного и черного металлопроката / А.Б. Люхтер, Д.С. Гусев и [др.] // *Инновационные проекты кооперации вузов и предприятий машиностроения: практика внедрения лазерных технологий: материалы всерос. совещ.-конф. 6 нояб. 2015 г., г. Владимир [Электронный ресурс] / Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2015. – С. 131-135. – Библиогр. с. 135. – ISBN 978-5-9984-0652-2. –1 электрон. опт. диск (CD-ROM).*

Личный вклад соискателя в публикациях

В работах [1, 2, 3, 4] – проведение численного исследования; [3, 5, 7] – разработка методики проведения испытаний, анализ результатов; [4, 5, 6] – статистическая обработка результатов, анализ результатов; [8, 9] – обработка экспериментальных результатов; [10, 11] – подбор технологических сварочных режимов.