

ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО НАУЧНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
«ТВЕРСКОЙ ИНСТИТУТ ВАГОНОСТРОЕНИЯ»
(ЗАО НО «ТИВ»)

На правах рукописи



Жуков Александр Сергеевич

**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КУЗОВА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА
ИЗ ЭКСТРУДИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПАНЕЛЕЙ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Антипин Дмитрий Яковлевич

Москва – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	13
1.1 Опыт применения алюминиевых сплавов при создании подвижного состава за рубежом.....	15
1.2 Опыт применения алюминиевых сплавов при создании подвижного состава в СССР и РФ.....	29
1.3 Варианты конструкций кузова пассажирского вагона, технология их изготовления, положение дел в современном отечественном вагоностроении	41
Выводы по разделу 1.....	54
2 РАЗРАБОТКА КУЗОВА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА С ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ, СФОРМИРОВАННЫМ ИЗ ЭКСТРУДИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПАНЕЛЕЙ	56
2.1 Описание объекта исследования	57
2.2 Предварительная проверка соответствия кузова требованиям нормативной документации	63
2.3 Разработка конечноэлементной модели кузова исследуемого объекта....	69
2.4 Экспериментальное исследование напряжённо-деформированного состояния экструдированной панели	78
Выводы по разделу 2.....	86
3 МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПАНЕЛЕЙ.....	89
3.1 Упрощение расчётной схемы.....	89
3.2 Сведение к системе обыкновенных дифференциальных уравнений	94
3.3 Применение разработанной методики для расчёта предложенной конструкции кузова.....	107
Выводы по разделу 3.....	112
4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ.....	113
4.1 Расчёт стоимости жизненного цикла пассажирского вагона с алюминиевым кузовом.....	113
4.2 Исходные данные для расчёта и его выполнение.....	115
Выводы по разделу 4.....	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	138
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	140
ПРИЛОЖЕНИЕ А	158

ВВЕДЕНИЕ

Сплавы на основе алюминия в транспортном машиностроении являются наиболее используемыми конструкционными материалами после сплавов на основе железа [1]. Их широкое применение в авиастроении (несмотря на постепенное вытеснение современными композиционными материалами [2–4]), кораблестроении [5], пассажирском вагоностроении (зарубежном) [6–12], автомобилестроении [13] обусловлено наличием ряда выгодных физических и химических свойств (обеспечение требуемой прочности, небольшой удельный вес, высокая пластичность, коррозионная стойкость, отсутствие токсических свойств, способность к демпфированию колебаний, поглощению энергии и др.).

Несмотря на все свои достоинства, алюминиевые сплавы до сих пор в должной мере не рассматриваются как конструкционные материалы для проектирования и изготовления основных узлов кузовов серийных отечественных пассажирских вагонов.

Актуальность темы исследования.

Железнодорожный транспорт играет одну из ключевых ролей с точки зрения развития нашей страны [14], ведь «от состояния и качества работы железнодорожного транспорта зависят не только перспективы дальнейшего социально-экономического развития, но также возможности государства эффективно выполнять такие важнейшие функции, как защита национального суверенитета и безопасности страны, обеспечение потребности граждан в перевозках, создание условий для выравнивания социально-экономического развития регионов» [15].

В настоящее время на железных дорогах России эксплуатируются более двадцати тысяч пассажирских вагонов различных моделей. При этом свыше половины вагонов имеют срок службы 18 и более лет, т. е. уровень износа парка пассажирских вагонов превысил 50 % [16], что подтверждается сведениями о потребности железнодорожного транспорта общего пользования в обновлении подвижного состава [15, приложение № 2]. Динамика производства вагонов и

ввода в эксплуатацию по годам представлена на рисунке 1.1, а потребность железнодорожного транспорта общего назначения в обновлении подвижного состава по данным ОАО «РЖД» представлена в таблице 1.1.

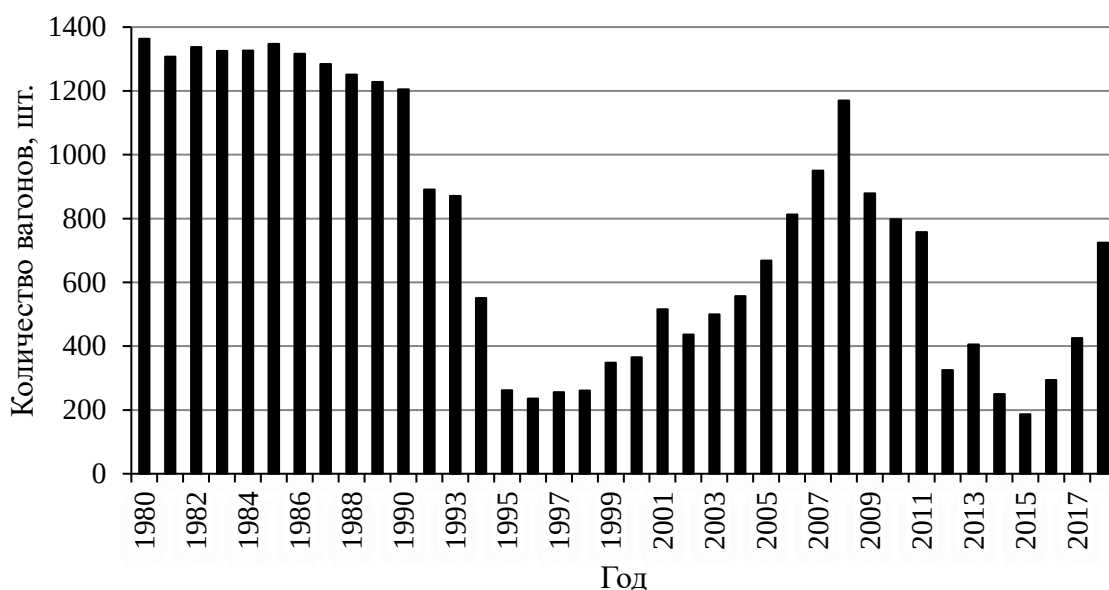


Рисунок 1.1 – Динамика производства и ввода в эксплуатацию пассажирских вагонов в РФ¹

Таблица 1.1 – Потребность железнодорожного транспорта общего назначения в обновлении подвижного состава

Вид подвижного состава	Единица измерения	Количество (на 2016–2030 годы)
Пассажирские вагоны	Вагонов	11507/12717 (4088/5143)*
Моторвагонный подвижной состав	То же	12792/15740

* Здесь и далее в числителе указано количество при минимальном варианте развития, в знаменателе – при максимальном, при этом, в скобках, – количество приобретённого и одобренного к приобретению подвижного состава² в период с 2016 по 2025 гг.

Согласно [15] в нашей стране в ближайшем будущем должно быть организовано движение на специализированных высокоскоростных магистралях (ВСМ) со скоростями движения поездов на отдельных участках до 350–400 км/ч.

¹ Сведения получены из работы [16] и годовых отчётов и информационных сообщений ОАО «ФПК»

² Сведения получены из годовых отчётов и информационных сообщений ОАО «ФПК»

Реализация указанных проектов будет способствовать развитию железнодорожной транспортной системы, а также отечественного вагоностроения.

Кроме этого, [15] определяет основные направления научных исследований в области железнодорожного транспорта, среди которых:

- разработка нормативно-методологической базы для расчетов параметров эксплуатационной готовности, прочности, безопасности и ресурса подвижного железнодорожного состава;
- разработка новых технических требований на серийно поставляемую продукцию, а также на новые типы подвижного состава с минимизацией затрат на жизненный цикл эксплуатации;
- увеличение скоростей движения, производство скоростных и высокоскоростных поездов, строительство двухэтажных вагонов;
- улучшение взаимодействия в системе «колесо–рельс»;
- создание систем комплексной диагностики инфраструктуры на скорости до 200 км/ч.

Решение указанных задач возможно благодаря продолжению исследования свойств и последующему применению в конструкции кузовов современных отечественных пассажирских вагонов и вагонов специального подвижного состава материалов и сплавов малой плотности и высокой удельной прочности, например, алюминиевых сплавов, хорошо зарекомендовавших себя в зарубежном вагоностроении [17].

Таким образом, разработка российского легковесного подвижного состава (в частности серийных пассажирских вагонов) является актуальной задачей, а дальнейшее развитие данного вопроса позволит расширить применение отечественных конструкций и улучшить позиции России на мировом рынке высокотехнологичной продукции и услуг, повысив при этом конкурентоспособность [18].

Кроме этого, ввиду вышеупомянутого значительного износа парка пассажирского железнодорожного подвижного состава, решение указанной задачи

становится необходимостью, а переход от традиционной³ конструкции кузова к конструкции кузова вагона, поперечное сечение которого сформировано из алюминиевых профилей (панелей), с учётом объёма заменяемых вагонов, – рациональным решением.

Степень разработанности темы исследования.

В настоящее время в РФ отсутствуют технические стандарты, необходимые для проектирования, производства и последующей эксплуатации пассажирских вагонов с кузовами из алюминиевых сплавов. Из-за этого, даже благодаря производству электропоезда «Ласточка» совместным предприятием Группы Синара и концерна Siemens «Уральские локомотивы» (г. Верхняя Пышма, Свердловская обл.) сейчас нельзя выполнить задачу, поставленную Президентом РФ В. В. Путиным, а именно, создания техники, обладающей конкурентоспособностью на мировом рынке, ввиду отсутствия собственной технической документации.

Вследствие необходимости учёта максимально возможного числа негативных факторов, влияющих на подвижной состав и возникающих на всех этапах его жизненного цикла, формирование нормативной базы (как в целом, так и отдельных её положений) представляет собой сложную задачу. Кроме этого, при формулировании требований, относящихся к вновь разрабатываемым конструкциям легковесных вагонов, отличных от традиционных, необходимо учитывать опыт проектирования, испытаний и эксплуатации положительно зарекомендовавших себя аналогичных изделий, большая часть которых – зарубежные.

Основное внимание, ввиду необходимости обеспечения безопасности пассажиров и обслуживающего персонала, при переходе от используемого в настоящее время типа конструкции кузова к вновь разрабатываемому, должно быть уделено вопросам обеспечения прочности, жёсткости, устойчивости, усталостной долговечности и динамических качеств.

³ Здесь и далее под традиционной понимается сварная цельнометаллическая конструкция кузова пассажирского вагона из нержавеющей и низколегированных сталей типа замкнутой оболочки с вырезами для окон и дверей, в которой тонкостенная обшивка подкреплена каркасом из дуг, стоек, поперечных и продольных балок

В настоящее время повышается интерес к выбору алюминия и его сплавов в качестве конструкционных материалов среди отечественных учёных и инженеров, однако, большая часть работ проводится в отрасли грузового вагоностроения [19–23]. Здесь, в качестве примера, можно выделить работы А. Д. Конюхова [23–26], А. М. Дрица [27–28], Н. А. Битюцкого [29–31].

За последние 10 лет в отечественном пассажирском вагоностроении существенный теоретический вклад в решение проблем разработки и исследования кузовов подвижного состава из экструдированных алюминиевых панелей, в том числе в части определения их теплотехнических свойств, внесли учёные Самарского государственного университета путей сообщения А. Н. Балалаев, В. А. Краснов, М. А. Пареньюк, А. С. Мокшанов, И. К. Андрончев, Д. А. Киселев [32–37]. Такой интерес к теме применения алюминиевых сплавов связан с планируемым ещё в 2013 г. формированием в Самарской области кластера по производству алюминиевых вагонов.

Отдельные вопросы, связанные с применением алюминия и алюминиевых сплавов в вагоностроении, были рассмотрены в диссертационных работах [38–41].

Анализируя публикации зарубежных учёных по теме применения экструдированных алюминиевых панелей в вагоностроении можно сделать вывод об их более прикладном характере, ввиду значительного объёма уже находящихся в эксплуатации пассажирских вагонов. Это – оптимизация сварных либо болтовых соединений, постепенное улучшение уже существующих конструкций, развитие применяемых алюминиевых сплавов, направленность на улучшение виброакустических характеристик с целью повышения комфорта пассажиров, безопасность пассажиров и т. д. В качестве примера можно выделить следующие работы [42–49].

К сожалению, в настоящее время Россия вынуждена покупать пассажирские поезда с кузовами из алюминиевых сплавов за рубежом, например, в Германии. Вместо этого, необходимо направить с помощью экономических и административных «рычагов управления» вектор интересов всех участников процесса (производителей, исследователей, разработчиков, инвесторов, заказчиков) в одно русло и

добиваться развития отечественных технологий в области пассажирского вагоностроения.

Направленность на закупку зарубежного подвижного состава, а также неудовлетворительная организация финансовых потоков, направляемых на научные разработки в области отечественной транспортной науки, являются наиболее негативными факторами, тормозящими развитие отечественного вагоностроения.

Цели и задачи.

Целью работы является обоснование конструкции кузова пассажирского вагона из экструдированных алюминиевых панелей.

Для достижения поставленной цели были определены и решены следующие задачи:

1 рассмотрен и проведен анализ структуры вагонов пассажирского парка, эксплуатируемых в настоящее время, обоснована необходимость перехода к «новому» конструкционному материалу;

2 предложен вариант конструкции пассажирского вагона с кузовом из экструдированных алюминиевых профилей;

3 разработана конечно-элементная модель несущей конструкции кузова;

4 разработана методика расчёта экструдированных алюминиевых профилей, позволяющая значительно упростить начальные стадии разработки конструкции кузовов;

5 выполнен сравнительный расчёт жизненного цикла алюминиевого и стального вагонов.

Научная новизна заключается в следующем:

1 на основе опыта применения алюминиевых сплавов предложен вариант кузова пассажирского вагона, поперечное сечение которого сформировано из экструдированных алюминиевых панелей;

2 предложен вариант проверки соответствия требованиям нормативной документации по моментам сопротивления крыши и боковых стен для кузова пассажирского вагона с поперечным сечением, выполненным из экструдированных алюминиевых панелей;

3 разработана методика расчёта (учёта в общей структуре кузова) экструдированных алюминиевых панелей и проведена её экспериментальная проверка;

4 на основе проведённого сравнительного расчёта стоимости жизненного цикла (далее – СЖЦ) серийного пассажирского вагона и вагона с предложенным вариантом кузова подтверждена возможность создания экономичных конструкций из алюминиевых сплавов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая и практическая значимость работы обусловлена возможностью создания вагона, отличающегося повышенными технико-экономическими показателями.

Предложенная методика расчёта алюминиевых панелей может быть применена для разработки конструкторских решений при проектировании кузовов пассажирских вагонов, а разработанная конструкция кузова – при оформлении конструкторской документации и изготовлении кузова.

Методология и методы исследования.

Для анализа напряжённо-деформированного состояния предложенного варианта кузова пассажирского вагона из алюминиевых экструдированных профилей, а также панели, рассмотренной в качестве объекта для испытаний, использованы программные комплексы Femap и SCAD, реализующие метод конечных элементов (МКЭ). При проведении испытаний экструдированной панели – тензометрический метод.

Положения, выносимые на защиту.

1 Вариант проверки соответствия требованиям нормативной документации по моментам сопротивления крыши и боковых стен для кузова пассажирского вагона с поперечным сечением, выполненным из экструдированных алюминиевых панелей.

2 Методика расчёта экструдированных алюминиевых профилей.

3 Конструкция пассажирского вагона из алюминиевых экструдированных профилей.

4 Технико-экономическое обоснование.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов работы подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов расчётов с данными испытаний.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на шести научно-технических и научно-практических конференциях: «Проблемы и перспективы развития вагоностроения» (БГТУ, 2014, 2016), «Проблемы и перспективы подвижного состава железных дорог» (БГТУ, 2017), «Проблемы безопасности на транспорте» (БелГУТ, 2015), «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты» (ПГУПС, 2016, 2017).

Основные положения диссертации и научные результаты опубликованы в 11 работах, из них четыре опубликованы в журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК России для публикации научных результатов диссертаций.

Личный вклад соискателя.

1 Проведён анализ отечественных и зарубежных конструкций алюминиевых кузовов пассажирских вагонов, оценена достаточность существующей в РФ нормативной базы, а также возможность производства российскими предприятиями таких конструкций.

2 Предложен вариант проверки соответствия требованиям нормативной документации по моментам сопротивления крыши и боковых стен для кузова пассажирского вагона с поперечным сечением, выполненным из экструдированных алюминиевых панелей.

3 Разработана и описана конструкция кузова пассажирского вагона со сформированными из экструдированных алюминиевых панелей поперечным сечением и торцевыми стенами.

4 Разработана конечноэлементная модель кузова вагона.

5 Проведена оценка соответствия вновь разработанного кузова требованиям нормативной документации.

6 Проведено экспериментальное и аналитическое исследование напряжённо-деформированного состояния экструдированной панели, входящей в конструкцию кузова.

7 Предложена методика учёта панелей при расчёте конструкции кузова, позволяющая на этапе проектирования и подготовки к производству упростить расчётную схему и существенно сократить время на проведение работ.

8 Проведено технико-экономическое обоснование и подтверждена экономия СЖЦ пассажирского вагона с кузовом из алюминиевых сплавов по сравнению со стальным кузовом.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, состоящего из 168 наименований, приложения. Общий объём диссертации составляет 160 страниц машинописного текста, содержит 62 рисунка и 24 таблицы.

Автор выражает благодарность д.т.н., профессору В. В. Кобищанову за помощь в организации диссертационного исследования.

Принятые допущения и ограничения.

1 В диссертационной работе не рассмотрены иные конструкционные материалы (композиционные, полимерные и др.), а также варианты изготовления комбинированного кузова (сталеалюминевый, металлопластмассовый и др.), ввиду существенного повышения трудоёмкости работ при изготовлении и последующей эксплуатации, необходимости проведения большого количества дополнительных научно-исследовательских работ (НИР) (по вопросам изготовления, соединения узлов и др.).

2 Оценка напряжённо-деформированного состояния кузова разработанного вагона и экструдированной алюминиевой панели выполнена с использованием пластинчатой конечноэлементной модели.

3 Верификация данных о местном напряжённо-деформированном состоянии экструдированной алюминиевой панели проведена на основании результатов статических испытаний образца.

4 В диссертационной работе не рассмотрены вопросы оптимизации конструкции кузова, а также выбора способов установки подвагонного и внутреннего оборудования, являющиеся темой отдельных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

5 Из-за введения ограничения о нерассмотрении вопроса установки внутреннего оборудования вопрос размещения изоляции (предполагается, что она должна устанавливаться внутри кузова вагона), ввиду их тесной взаимосвязи, также не рассмотрен.

6 При формировании методики расчёта экструдированной панели рассмотрена упругая стадия работы системы.

7 Ввиду отсутствия в необходимости определения профиля стоимости жизненного цикла, разбиение его по шагам не предусмотрено. Коэффициент дисконтирования α_t принят равным 1.

8 Стоимостные нормативы и иные показатели, принятые в расчёт для проведения сравнительного анализа СЖЦ, носят ориентировочный характер (приняты на уровне 2015–2016 гг.) ввиду действия в настоящий момент режима коммерческой тайны.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В 1854 году французским учёным Анри Этьеном Сент-Клер Девилем был открыт способ промышленного производства алюминия [50], а уже в 1894 г. началось его применение в вагоностроении – железнодорожная компания New York, New Haven and Hartford Railroad начала выпускать специальные легкие пассажирские вагоны, сиденья которых были выполнены из алюминиевого сплава [51].

Производство кузовов из алюминиевых сплавов наиболее перспективно в грузовом вагоностроении, где для обеспечения выгодных технико-экономических характеристик и повышения конкурентоспособности продукции требуется максимально снизить собственный вес конструкции. Так в 1931 г. в США был выпущен первый грузовой алюминиевый вагон-хоппер для перевозки сыпучих и гранулированных грузов. С тех пор алюминиевые полувагоны и вагоны-хопперы стали повсеместно использоваться на американских железных дорогах для перевозки угля, руд и минералов, зерна, вагоны-цистерны – для перевозки кислот, а вагоны-автомобилевозы – для перевозки автомобилей, только что сошедших с конвейеров. В начале 1960-х гг. алюминий в грузовом вагоностроении стал рассматриваться уже не только как материал, заменяющий сталь, но и как материал, позволяющий значительно изменить конструктивную схему вагона (а, следовательно, и технологию изготовления), позволяя при этом существенно снизить его массу и трудоёмкость работ по его производству. Например, фирме Alusuisse, применив новую технологию, предусматривающую использование крупногабаритных профилей (до 70% всех профилей, применённых при изготовлении вагона), выполненных из алюминиевого сплава методом экструзии, удалось изготовить кузов общей массой 6,7 т. [52]

Серийное производство грузовых вагонов с кузовами из алюминиевых сплавов освоено в США в 1986 г. На сегодняшний день в эксплуатации находится более 130 тысяч алюминиевых полувагонов (рисунок 1.2), крытых грузовых вагонов и вагонов-хопперов.



Рисунок 1.2 – Полувагон для перевозки угля на железных дорогах США

Серийное производство отечественных грузовых вагонов не освоено до сих пор, имеются лишь отдельные опытные либо выставочные образцы (рисунок 1.3) и небольшие партии образцов, проходящие подконтрольную эксплуатацию [53].



а



б



в



г

а – полувагон (НПО «УВЗ», 2003 г.); б – полувагон с кузовом из полых панелей (ВАСО, 2005 г.); в – вагон-хоппер («Рузмаш», 2016 г.); г – вагон-хоппер (Тихвинский вагоностроительный завод 2016 г.)

Рисунок 1.3 – Отечественные грузовые вагоны с кузовами из алюминиевых сплавов

Успех применения алюминиевых сплавов в сегменте изготовления кузовов зарубежного грузового подвижного состава (прежде всего американского), а также

преимущества новой технологии заставили специалистов из области пассажирского вагоностроения обратить внимание на «новый» конструкционный материал.

Далее приведен краткий обзор зарубежных и отечественных разработок в области пассажирского вагоностроения с применением алюминиевых сплавов и, в частности, алюминиевых экструдированных профилей.

1.1 Опыт применения алюминиевых сплавов при создании подвижного состава за рубежом

Уже более полувека кузова из алюминиевых сплавов широко применяются при производстве городского подвижного состава, поездов междугородного, регионального и международного сообщений стран Европы и Азии. За это время накоплен существенный опыт в разработке, изготовлении и эксплуатации легковесного подвижного состава.

Рассмотрим наиболее развитые, с точки зрения практического применения полученных знаний в области проектирования и последующего использования пассажирских вагонов с кузовами из алюминиевых сплавов, страны Европы и Азии.

Япония – первая страна мира, которая начала развивать высокоскоростное движение с целью решения транспортной проблемы, возникшей в регионе (основная ось японской сети железных дорог – направление Токио – Осака, где сконцентрировано около 40% населения). Дополнительным стимулом для развития транспортной системы послужило проведение Олимпийских Игр в 1964 г. К этому году была запущена ВСМ «Синкансен», которая с тех пор постоянно расширяется.

Кузова первых вагонов, используемых на вышеуказанной линии (серия 0, серия 100) были стальными, однако уже в 1970 г., после испытаний опытных поездов серии 951 и 961, а также с учётом эксплуатации поездов серии 962 и 925 (поезда для проверки устройств электроснабжения и геометрии пути), было

принято решение использовать кузова⁴ из алюминиевых сплавов с целью снижения общей массы вагонов.

Введение и постоянное развитие ВСМ потребовало и значительных изменений в конструкции подвижного состава.

Некоторые характеристики поездов ВСМ «Синкансен» приведены в таблице 1.2, а внешний вид поездов представлен на рисунке 1.4. При проектировании кузовов легковесных вагонов ВСМ «Синкансен» на всех этапах ее развития особое внимание уделялось максимальному облегчению без снижения прочности, по сравнению со стальным кузовом, и обеспечению сопротивляемости изгибным колебаниям, снижающим уровень комфорта для пассажиров.

Обзор истории высокоскоростных поездов Японии приведен в статьях Киселёва И. П. [54, 55].

Успех Японии был стремительным, и, поскольку, время поездки с введением высокоскоростного сообщения значительно сократилось, а пассажиропоток существенно вырос, это вовлекло и другие страны, в первую очередь Францию и Германию, в «соревнования» по развитию сети ВСМ, а, следовательно, и эксплуатируемого на них подвижного состава.

Несмотря на то, что особый интерес к скоростному движению во Франции зародился еще в первой четверти XX века, а значительного повышения коммерческой скорости движения на железной дороге удалось добиться в начале 1950-х годов, возможность строительства ВСМ Франция приобрела только в 1974 г., когда идея развития высокоскоростного движения, одобренная в кругах специалистов, практически сразу, после получения первой информации об эксплуатации подвижного состава на ВСМ «Синкансен», получила также поддержку и одобрение политических кругов страны.

Новый этап развития пассажирского подвижного состава во Франции начался 27 сентября 1981 г. с началом эксплуатации поездов TGV (train à Grande Vitesse) [56–58].

⁴ Сведения о структурных особенностях кузовов зарубежных вагонов и их классификация по применяемым схемам приведены в подразделе 1.3 настоящей диссертации

Таблица 1.2 – Поезда ВСМ «Синкансен» с кузовами из алюминиевых сплавов

Серия	200	300	700	N700	800	E1	E2	E3	E4	E5
Год постройки	1982	1992	1998	2007	2004	1994	1997	1997	1997	2011
Ширина колеи, мм	1435	1435	1435	1435	1435	1435	1435	1435	1435	1435
Конструкционная скорость, км/ч	240	285	285	300	285	240	315	275	275	320
Число вагонов в составе	10	16	8 или 16	16	6	12	8 или 10	6 или 7	8	10
Пассажировместимость, чел.		1323	1123 или 571	1323	384	1235	630 или 814	338 или 394/402	1634	731
Длина головного вагона, мм	26050	26050	27350	27350	27350	26050	25700	23070	25700	26500
Длина кузова, мм	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	20050	25000	25000
Ширина кузова, мм	3385	3380	3380	3360	3380	3380	3380	2945	3380	3350
Высота кузова, мм	4410	3650	3690	3600	3650	4493	3700	4080	4485	3650
Нагрузка на ось, т	17,0	11,4	11,4	11,4	11,4	17,0	13,0	13,0	16,0	11,4

*а**б**в**г**д**е**ж**з**и**к*

*а – серия 200; б – серия 300; в – серия 700; г – 700N; д – серия 800; е – серия E1;
ж – серия E2; з – серия E3; и – серия E4; к – серия E5*

Рисунок 1.4 – Легковесные поезда ВСМ «Синкансен»

Некоторые характеристики поездов ВСМ Франции приведены в таблице 1.3, а внешний вид поездов представлен на рисунке 1.5.

В поездах TGV Sud-Est, TGV-Atlantique и TGV-Reseaux доля применяемого в конструкции кузовов алюминия была незначительной. Однако, введение в эксплуатацию двухэтажных поездов TGV, отвечающих требованиям повышенной провозной способности, улучшенным экономическим показателям (как по капитальным затратам, так и по удельным эксплуатационным расходам на одно пассажиро-место) привело к пересмотру выбора конструкционного материала.

Для достижения соответствия перечисленным выше требованиям и условиям, предъявляемым к скоростному подвижному составу (среди которых – ограничение максимальной нагрузки до 17 т на ось, для выполнения которого французскими специалистами в области вагоностроения пришлось рассмотреть возможность снижения массы практически всех элементов каркаса кузова и внутренней отделки) были предложены многочисленные технические разработки.

Исследование французских специалистов в области вагоностроения о возможности создания двухэтажных вагонов показало, что даже нержавеющая или имеющая высокий предел упругости сталь не сможет обеспечить требуемого соотношения прочности и легкости конструкции кузова. В результате предпочтение при проектировании кузовов отдано профилям из алюминиевых сплавов, выполненных методами прокатки и экструзии.

Применение крупноразмерных алюминиевых профилей в металлоконструкции кузовов поезда TGV Duplex [59], а также оптимизация междвагонных сочленений позволили получить меньшую массу вагона даже по сравнению со стальными кузовами головных одноэтажных вагонов поезда TGV-Atlantique. Масса кузова вагона, включая пол второго этажа, составила 8 т. Профили, примененные при изготовлении, были выполнены из алюминиевых сплавов системы Al – Mg – Si (сплавы 6005, 6061, 6085), сочетающих в себе хорошие механические свойства, свариваемость и высокую коррозионную устойчивость.

Таблица 1.3 – Поезда TGV с кузовами из алюминиевых сплавов

Наименование	TGV Paris-Sud-EST*	TGV Atlantique*	TGV Réseau*	TGV Eurostar	TGV Thalys PBA	TGV Thalys PBKA	TGV Duplex	TGV Est-Européen (POS)
Количество построенных составов, шт.	109	105	80	31	10	17	89	19
Год ввода в эксплуатацию	1981	1989	1991	1994	1996	1997	1996	2007
Максимальная скорость, км/ч	270–300	300	320	300	320	320	320	320
Количество промежуточных вагонов в составе, шт.	8	10	8	18	8	8	8	8
Максимальная мощность, кВт	6300	8800	8800	12200	8800	8800	8800	9280
Длина состава, м	200,2	237,6	200,2	394,0	200,2	200,2	200,2	200,2
Вес, т	409/428	479	388	752	386	416	380	423
Количество мест для сидения	386, в составах, состоящих из вагонов первого класса – 287, после модернизации – 345	485	377	750	377	377	545	360
* Кузова головных вагонов выполнены из алюминиевых сплавов, прицепных – из стали								

*a**б**в**г**д**е**ж**з*

a – TGV Paris-Sud-EST; *б* – TGV Atlantique; *в* – TGV Réseau; *г* – TGV Eurostar;
д – TGV Thalys PBA; *е* – TGV Thalys PBKA; *ж* – TGV Duplex; *з* – TGV Est-Européen (POS)

Рисунок 1.5 – Легковесные поезда TGV

Конструкция пола второго этажа – трехслойная (алюминиевая сотовая структура была обшита с двух сторон алюминиевым листом). Алюминиевые сотовые конструкции использованы также при проектировании и изготовлении крыши.

Большое внимание при разработке вновь проектируемых легковесных кузовов уделялось безопасности пассажиров. Концепция всего поезда была основана на оптимизации конструкции в отношении прочности при соударении: были сформированы зоны безопасности в голове и хвосте поезда, имеющие пониженную жёсткость и сминающиеся при воздействии силы сжатия свыше 250 т (планировкой вагонов предусмотрено расположение в этих зонах багажных отделений), а также спроектированы сминаемые зоны в концах прицепных вагонов. Общее сопротивление сжатию пассажирских зон доведено до 400–500 т. Дополнительно были предусмотрены устройства, препятствующие набеганию хвостового моторного вагона на прицепной.

Структура сети железнодорожных ВСМ определяется характером территориального распределения населения. В Японии и Франции скоростное сообщение имеет выраженный линейный характер, в Германии – сетевой с расположением жилых и промышленных районов с расстояниями между центрами 75–100 км. Кроме того, модернизируемые и вновь создаваемые линии проектируются на смешанное движение (пассажирское и грузовое), поэтому немецкие специалисты не стремились и не стремятся в настоящее время к созданию железнодорожного подвижного состава для достижения рекордных скоростей движения. Многочисленные исследования показали, что оптимальная скорость движения подвижного состава по высокоскоростным линиям Германии не должна превышать 250–300 км/ч.

Рассмотрим развитие конструкции кузовов легковесных пассажирских вагонов Германии на примере «эволюции» наиболее показательного междугородного поезда, изготовленного в 1985 г. и способного обращаться по линиям со скоростью 250 км/ч. Этот поезд, получивший международное обозначение ICE [60–63], должен был стать основой для изучения и опробования современной технологии скоростного железнодорожного сообщения, а впоследствии, опыт, накопленный при его проектировании, создании и испытаниях должен был быть применен при создании серийного экспресса, соответствующего требованиям спроса, эксплуатации, современному и перспективному уровню техники.

Для расчёта головного вагона поезда ICE на начальном этапе немецкими учёными были использованы пластинчато-стержневые расчётные схемы (все профили, например, обвязочные, профили стоек, дуг и т. д. были смоделированы стержневыми элементами, а листовая обшивка стен, настила пола, крыши – пластинчатыми).

Для более точного расчета напряженного состояния МКЭ в критических зонах структуры был применён так называемый Zoom-метод (последовательное выделение областей с возрастающей густотой сетки), благодаря которому удалось уменьшить массу кузова головного вагона почти на 400 кг по сравнению с предварительным расчётом.

МКЭ применялся также для анализа динамических качеств кузова (ходовые свойства, плавность движения). Расчёт кузова вагона ICE показал, что частота основной гармоника собственных вертикальных колебаний составляла около 10 Гц, при этом собственные колебания имели классическую форму (концы кузова колеблются в противофазе с центральной частью).

Экспериментальные измерения напряжений, проведённые на необорудованном кузове, показали хорошую сходимость с результатами расчёта.

При формировании поперечного сечения кузовов вагонов ICE была применена «модульная панель», состоящая из листа с выпрессованными на нём конусообразными выступами и гладкого листа с внешней стороны. Оба листа были соединены точечной сваркой. Такая панель отличалась высокой стойкостью к продольному и поперечному изгибу. Для снижения амплитуды собственных изгибных колебаний кузова, предотвращения резонансных явлений при колебаниях подёргивания и продольной качки были применены крышевые дуги, крепящиеся на болтах. В поперечное сечение кузова было включено по два мощных полых профиля у верхних и нижних краев боковых стен, проходящих почти по всей длине вагона и не прерывающихся дверными и оконными вырезами. Для увеличения жёсткости конструкции боковые стены между нижним поясом и нижним краем оконного блока были выполнены из «модульных панелей», встроенных в несущий каркас из труб прямоугольного сечения. Для рационального

использования материала использована конструкция рамы кузова, в которой хребтовая балка воспринимала значительную часть сжимающих усилий.

Для концевых моторных вагонов каркас кузова выполнялся из стали, для прицепных – из алюминиевых сплавов $AlMgSi0,7$ и $AlZn4,5Mg1$.

Для уменьшения аэродинамического сопротивления на прицепных вагонах были предусмотрены полусферические днища, не входящие в несущий кузов. Они имели профильный каркас, обшитый листами из волокнистого синтетического материала. Наружная форма головной части поезда была определена требованиями аэродинамики и аэроакустики, спроектирована с учётом проведенных теоретических и экспериментальных исследований. Позади неё был предусмотрен мощный каркас, способный воспринимать аварийные ударные нагрузки. Передний обтекатель, на котором была закреплена откидная крышка, изготавливался из композиционного материала, армированного стекловолокном.

Некоторые характеристики поезда ICE 1 и его последующих модификаций (ICE 2, ICE 3) приведены в таблице 1.4, общий вид и поперечные сечения прицепных вагонов представлены на рисунке 1.6.

Таблица 1.4 – Некоторые характеристики поездов семейства ICE

Показатель	ICE 1 (14 вагонов)	ICE 2 (8 вагонов)	ICE 3 (8 вагонов)
1	2	3	4
Год начала поставки	1988	1996	1998-1999
Конструкционная скорость, км/ч	280	280	300/330
Общая длина по автосцепкам, м	358	205	200
Длина вагона			
головного моторного, мм	20810	20560	—
головного с кабиной управления, мм	—	26400	—
головного, мм	—	—	25835
промежуточного, мм	26400	26400	24775
База вагона, мм	17375	17375	17375
Колесная база тележки			
моторной, мм	3000	3000	2500

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3	4
Колесная база тележки поддерживающей, мм	2500	2500	2500
Высота вагона, мм	3840	3840	3890
Ширина кузова, мм	3020	3020	2950
Служебная масса нетто с полной экипировкой, т	782	422	405/420
Общее число мест, включая вагон-ресторан	669	391	415/404
Удельная масса, т/место	1,17	1,08	0,98/1,04
Максимальная осевая нагрузка, т	19,5	19,5	15/16

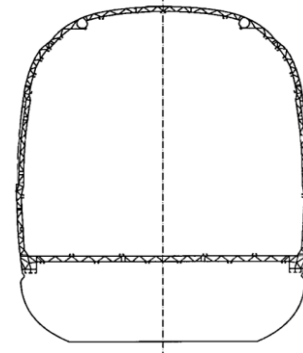
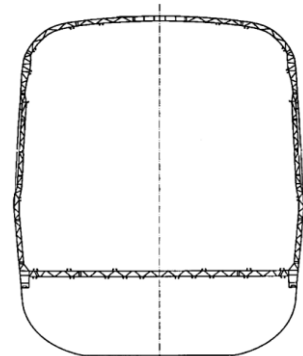
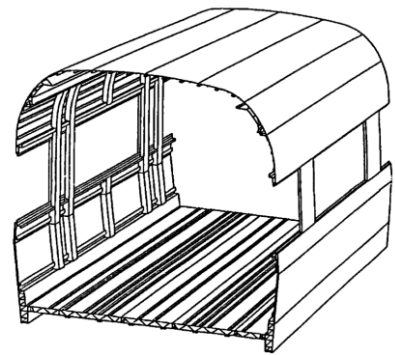


Рисунок 1.6 – Внешний вид поездов семейства ICE и поперечное сечение их прицепных вагонов (сверху-вниз: ICE 1, ICE 2, ICE 3)

Алюминиевые сплавы, как конструкционные материалы, хорошо зарекомендовали себя при строительстве опытного и начале освоения серийного производства поездов ICE 1, поэтому вопрос об их дальнейшем применении либо замене на высокопрочную сталь (несмотря на попытки доказать преимущество стали по сравнению с алюминиевыми сплавами, предпринятыми фирмами-изготовителями подвижного состава со стальными кузовами) при проектировании и изготовлении следующих поездов семейства ICE не рассматривался.

Вместо этого для всех вагонов высокоскоростных поездов DB⁵ применение сплава AlMgSi0,7 стало обязательным требованием, ввиду его хорошей свариваемости, термической упрочняемости и устойчивости к коррозии, а одним из требований к перспективному пассажирскому подвижному составу стало формирование кузовов вагонов с использованием максимального числа «модульных панелей».

Вследствие значительного упрощения технологического процесса изготовления кузовов вагонов из таких профилей наметилась стойкая тенденция к их использованию небольшими частными фирмами-изготовителями подвижного состава, поэтому большое внимание было уделено стремлению к стандартизации таких конструкций с целью обеспечения удобства их использования как поставщиками, так и пользователями (проектировщиками). Помимо этого, была сделана попытка перехода к методу холодной сборки с болтовыми соединениями вместо сварных, а также формированию многослойных панелей на основе экструдированных алюминиевых профилей.

Итальянские разработчики большое значение уделили исследованиям по снижению трудоёмкости изготовления кузова, поэтому для оптимизации поперечного сечения пресованных профилей из алюминиевого сплава и уменьшения их количества был проведен большой объём работ.

В качестве примера можно привести кузова электропоездов ET-403 и ET-420. В конструкции первого было применено 22 экструдированных алюминиевых профиля, второго – 16 (рисунок 1.7), что позволило снизить затраты и время на изготовление.

⁵ Deutsche Bahn AG, основной железнодорожный оператор Германии

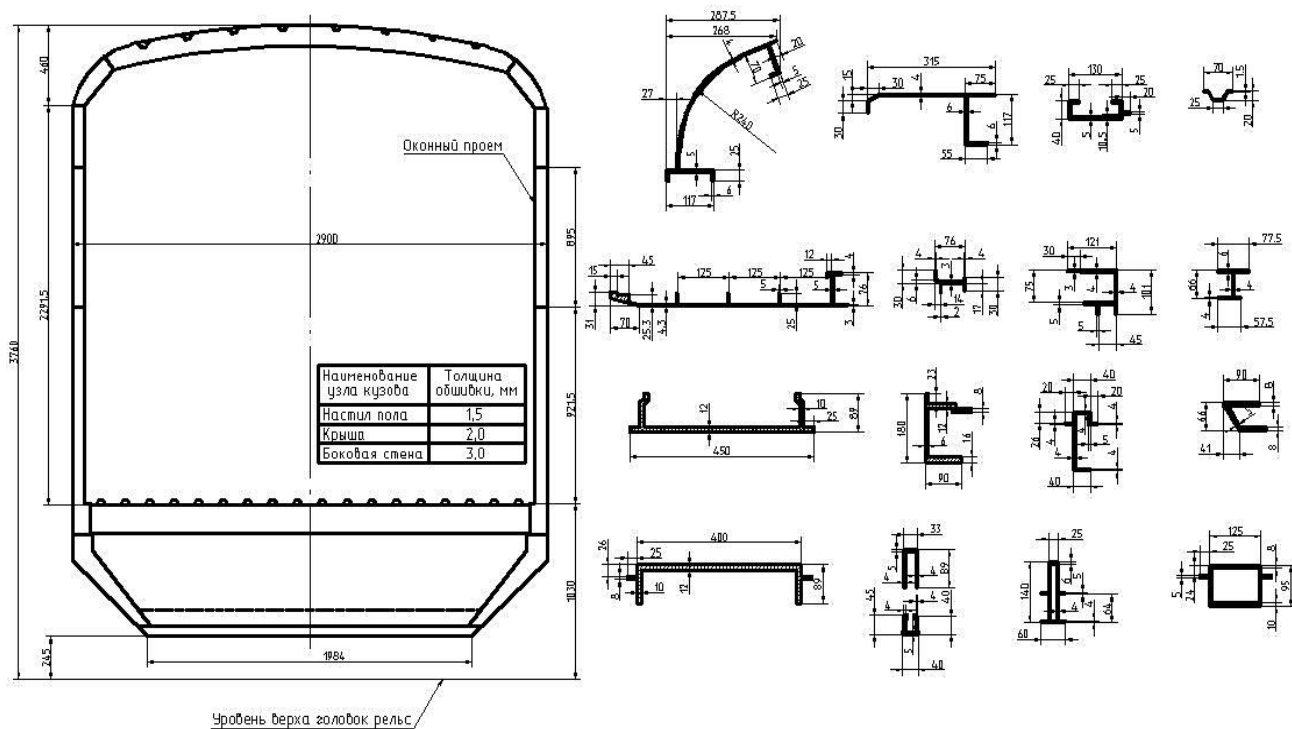


Рисунок 1.7 – Поперечное сечение электропоезда ЕТ-420 и прессованные профили из алюминиевых сплавов, применяемые при его изготовлении

Работы, проведённые в целях снижения трудоёмкости изготовления были с успехом применены при разработке нового подвижного состава.

Так в 1990-х гг. после анализа конструкций, как уже существовавших на железных дорогах Италии (ETR 200, ETR 300 Settebello, Ale 601, ETR 401 Pendolino, ETR 420, ETR 450, ETR 460, ETR 470), так и перспективных, была определена концепция и назначены основные этапы развития высокоскоростного электропоезда ETR 500 [64] (рисунок 1.8), который должен соответствовать постоянно растущим требованиям к транспорту и обеспечить конкурентоспособность железнодорожных перевозок в сравнении с другими видами транспорта на длительный период времени.



Рисунок 1.8 – Общий вид итальянского поезда ETR 500

Несущие элементы конструкции кузова прицепных вагонов выполнены из высокопрочной стали, наружная обшивка – из алюминиевых экструдированных элементов. Обтекаемая передняя часть моторного вагона изготовлена из композиционного материала, состоящего из полиамидного волокна и эпоксидной смолы.

Некоторые характеристики поезда ETR 500 приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Характеристики поезда ETR 500

Показатель	ETR 500	ETR 500 «AV»*
1	2	3
Год начала эксплуатации	1992	2000
Конструкционная скорость, км/ч	300	300
Общая длина по автосцепкам, м	327,6	327,6
Длина вагона		
головного моторного, мм	20800	20800
прицепного, мм	26100	26100
База вагона		
головного моторного, мм	12000	12000
прицепного, мм	19000	19000
Высота вагона		
головного моторного, мм	4000	4000
прицепного, мм	3800	3800

Продолжение таблицы 1.5

1	2	3
Ширина вагона головного моторного, мм прицепного, мм	3020 2845	3020 2845
Служебная масса нетто с полной экипировкой, т	598	598
Общее число мест	187/469	При 8 прицепных вагонах – 136/268; при 11 – 187/469; при 12 – 195/476
Максимальная осевая нагрузка, т	16,5	16,5
*Эксплуатируется в настоящее время		

Для разработки проекта электропоезда был создан консорциум, в который вошли фирмы ABB Tecnomasio, Ansaldo Transporti, Breda Costruzioni Ferroviarie, Fiat Ferroviaria Savigliano.

При проектировании прицепных вагонов особое внимание было уделено внешнему виду и уровню комфорта пассажиров. В обшивке кузова были использованы крупноразмерные экструдированные профили из сплава 6005. Конструкция вагонов – модульная, что позволяло при унифицированном каркасе кузова получать различную планировку для размещения мест первого и второго классов. Помимо этого, использование экструдированных профилей позволило сделать легкий кузов достаточно жёстким и уменьшить колебания и вибрацию, снижающие уровень комфорта. Облегчение кузова в сравнении с аналогичными конструкциями из стали составило 30 %.

1.2 Опыт применения алюминиевых сплавов при создании подвижного состава в СССР и РФ

В нашей стране работы по производству и прикладные исследования легко-весных конструкций кузовов, с целью их применения в пассажирском вагоностроении, начались в период с 1965 по 1970 гг. Однако, на сегодняшний день

серийное производство кузовов вагонов из алюминиевых сплавов отсутствует, научно-исследовательские работы по данному вопросу ведутся фрагментарно и стихийно, а общее число построенных опытных кузовов с использованием в конструкции алюминиевых сплавов не превышает тридцати.

Можно выделить следующие хронологические (связанные с изготовлением нового варианта кузова) этапы применения алюминиевых сплавов в пассажирском вагоностроении СССР и РФ.

Первый этап – 1958–1961 гг. В это время был спроектирован и изготовлен пассажирский вагон межобластного сообщения [65, с. 72] длиной 23,6 м с кузовом из алюминиевого сплава марки АМгб следующей конструкции (рисунок 9).

Нижняя обвязка рамы кузова была выполнена штамповкой из листа толщиной 10 мм на консолях и 6 мм в средней части. Верхняя обвязка кузова имела форму неравнополочного зетового профиля сечением $82 \times 3,5 \times 22 \times 8 \times 50 \times 5$ мм. Стойки коробчатой формы имели толщину стенок 4 мм, дуги крыши – зетового сечения толщиной 4 мм.

Обшивка боковых стен, снабженная гофрами, имела толщину в подоконном поясе и межоконных простенках – 4 мм, в надоконном поясе – 3 мм.

Гофрированная крыша была выполнена из листа толщиной 3 мм. Торцевая стена включала в свою конструкцию мощные дверные стойки двутаврового сечения, имеющего высоту 240 мм, ширину полок 150 мм, толщину вертикальной стенки 15 мм и полки 18 мм. Обшивка торцевой стены была снабжена вертикальными гофрами.

Рама вагона имела сквозную хребтовую балку, выполненную из двух швеллеров $300 \times 100 \times 14$ мм, перекрытых в консольных частях сверху и снизу листами толщиной 6 мм. В конструкции шкворневой балки коробчатой формы переменного сечения были применены вертикальные листы толщиной 14 мм. Для передачи продольных усилий на боковые стены были предусмотрены раскосы. Сверху консольная часть была перекрыта листом толщиной 4 мм. В средней части располагались поперечные балки и гофрированный пол. Соединение алюминиевых элементов было выполнено сваркой в среде инертного газа (аргона).

Форма профилей, применённых в конструкции кузова, была аналогична стальным профилям для серийных вагонов (ввиду неготовности алюминиевой промышленности в обеспечении вагоностроителей прессованными профилями более сложной формы), что в сумме с недостаточным опытом вагоностроительных заводов, а также необходимостью использования аргонно-дуговой сварки привело к значительному росту затрат на изготовление вагона.

Применение алюминиевого сплава позволило снизить массу вагона на 6260 кг по сравнению со стальным вагоном такого же типа с сохранением его прочности.

Второй этап – появление в начале 1960-х гг. комбинированного сталеалюминиевого (в целях снижения себестоимости и сокращения срока окупаемости дополнительных капитальных затрат) кузова (рисунок 1.9) [66]. Рама кузова, изготовленная из низколегированной конструкционной стали 09Г2, не имела центральной хребтовой балки на длине базы вагона. За счёт применения стальной рамы, помимо обеспечения необходимой изгибной жёсткости, на 40% был снижен расход алюминиевых сплавов. Средняя часть рамы включала 13 поперечных балок штампованного открытого профиля, перекрытых гофрированным в продольном направлении листом толщиной 2 мм из стали 15. Консольная часть рамы состояла из шкворневой и хребтовой балок, двух раскосов и буферного бруса. Пол в этих местах был выполнен из гладких листов толщиной 2 мм. Боковые и торцевые стены, а также крыша кузова были изготовлены из алюминиевого сплава марки АМг6.

Боковины выполнялись из гофрированной обшивки, подкрепленной изнутри вертикальными стойками, связанными сверху и снизу продольными элементами. Для верхнего и среднего поясов были использованы алюминиевые листы толщиной 2 мм, для нижнего – 3 мм.

Крыша (средняя часть и скаты) была выполнена из гофрированной обшивки, толщиной 2 мм, подкрепленной дугами.

Торцевые стены были выполнены из гофрированного листа толщиной 2 мм и армированы угловыми стойками коробчатого сечения. Каждая стена содержала

по обе стороны дверного проема антителескопические стойки двутаврового профиля с высотой сечения 240 мм.

Основным направлением НИР в это время стало отыскание метода соединения стали и алюминия с целью предотвращения контактной коррозии. Наилучшим способом защиты от контактной коррозии стало цинкование алюминиевых деталей, соприкасающихся со стальными деталями, с последующим их покрытием специальным грунтом, применяемым в судостроении.

Вагоны, выполненные на первых двух этапах, оказались экономически неэффективными. Помимо того, требовалось проведение дополнительных НИР, связанных, например, с необходимостью определения наиболее оптимального способа сварки профилей кузова.

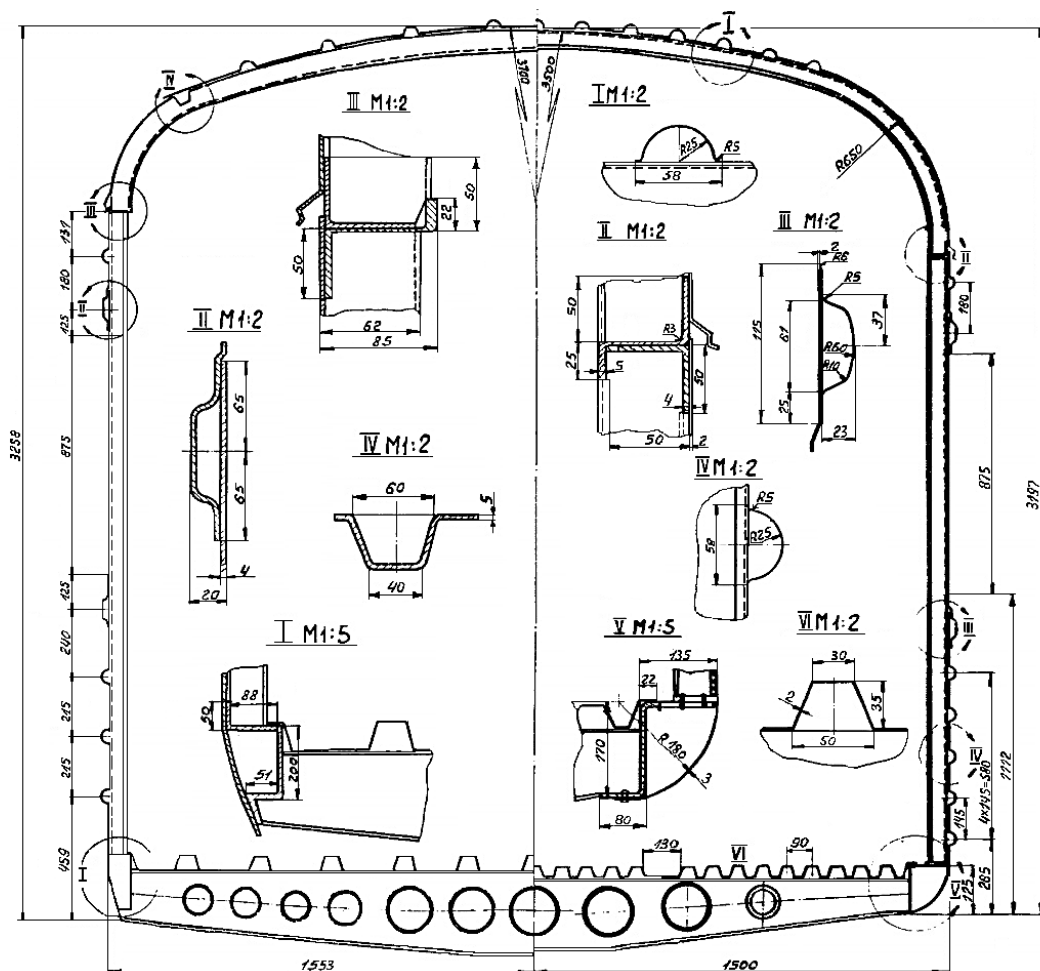


Рисунок 1.9 – Поперечное сечение алюминиевого (слева) и сталеалюминиевого вагонов (справа)

Третий этап – проектирование и изготовление в 1969 г. цельноалюминиевого кузова длиной 23,6 м для вагона ЦМВОА-69 [67].

Для несущей конструкции при изготовлении был применен алюминиевый сплав 1915, для обшивки – АМг6. При проектировании и изготовлении кузова вагона ЦМВОА-69 впервые были применены прессованные профили отличной от серийных стальных профилей формы (рисунок 1.10).

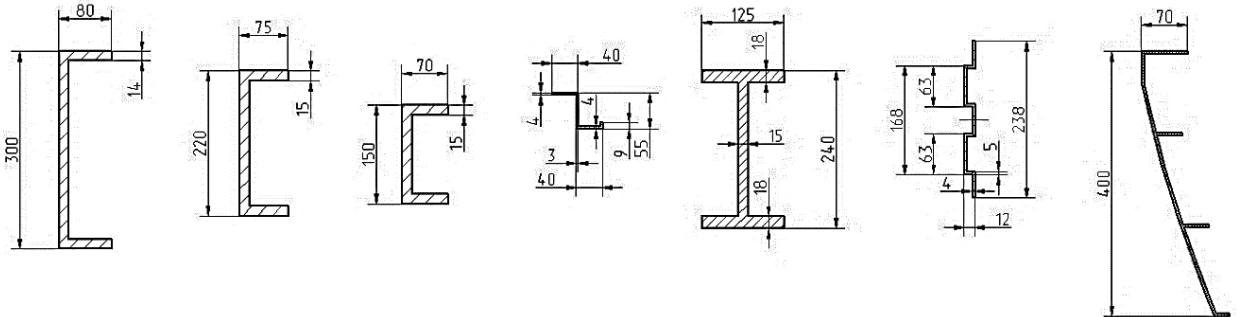


Рисунок 1.10 – Прессованные профили из алюминиевых сплавов, применённые при изготовлении кузова вагона ЦМВОА-69

Следующим этапом стало проектирование и изготовление на Калининском вагоностроительном заводе кузовов пассажирских вагонов межобластного сообщения (модель 61-185, рисунок 1.11) для поезда РТ-200 в 1970–1971 гг. [68, 69] (в 1970–1975 гг. можно определить тенденцию широкого применения алюминиевых сплавов в конструкциях для изготовления отдельных узлов внутреннего оборудования, комбинированных (сталеалюминиевые) и цельнометаллических кузовов, особенно для вагонов пригородного сообщения и скоростных).



Рисунок 1.11 – Общий вид вагона поезда РТ-200

Некоторые технические характеристики вагона поезда РТ-200 приведены в таблице 1.6, а поперечное сечение кузова вагона – на рисунке 1.12.

Таблица 1.6 – Технические характеристики вагона поезда РТ-200

Показатель	Значение
Ширина колеи, мм	1520 (1524)
Количество мест для пассажиров	76
Тара, т	42
База	
вагона, мм	19000
тележки, мм	2500
Длина	
по осям сцепления автосцепок, мм	26980
кузова наружная, мм	26384
Ширина вагона	
снаружи (без гофров), мм	3050
внутри, мм	2870
Высота вагона внутри от пола до потолка, мм	2409
Удельный вес тары на одно место, т	0,55
Конструктивная скорость, км/ч	200
Габарит по ГОСТ 9238	0-Т

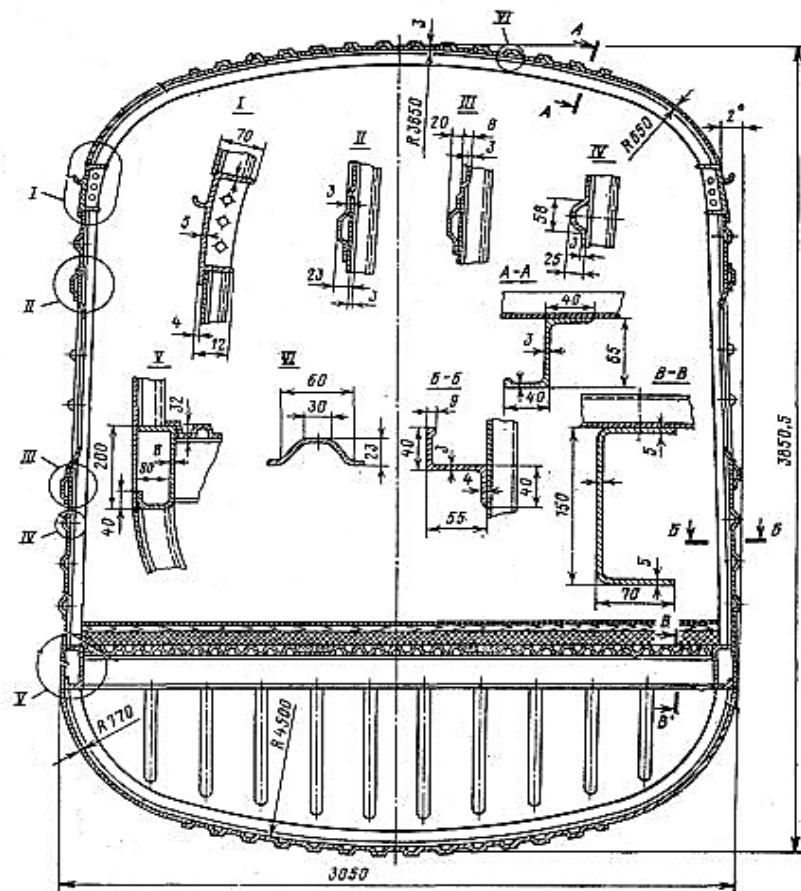


Рисунок 1.12 – Поперечное сечение кузова вагона поезда РТ-200

Ниже приведено описание кузова вагона поезда РТ-200 в соответствии с [68, 69].

По своей конструкции он отличался от традиционных, что повышало трудоёмкость изготовления опытного образца.

Основными несущими элементами кузова являлись каркас и обшивка, выполненные из пресованных и холодноштампованных профилей (алюминиевые сплавы 1915Т – для каркаса и АМг6М – для обшивки), соединенные между собой аргонодуговой сваркой.

Обшивка кузова была изготовлена из гофрированных листов.

Для уменьшения аэродинамического сопротивления боковые стены кузова были наклонены к вертикальной оси под углом 2° , а подвагонное пространство на длине 8,3 м в средней части кузова было перекрыто кожухом-обтекателем (являлся несущим элементом конструкции и повышал ее изгибную жёсткость). На остальной части кузова были установлены откидные фальшборты для улучшения аэродинамики вагона и обеспечения доступа для технического обслуживания подвагонного оборудования. Благодаря применению кожуха-обтекателя был снижен центр тяжести вагона, что обеспечило увеличение его поперечной устойчивости при вписывании в кривые участки пути.

Рама кузова была выполнена без хребтовой балки в средней части с усиленной консольной зоной. Хребтовая балка в консольных частях состояла из двух швеллеров $300 \times 80 \times 14$ мм, перекрытых верхним и нижним горизонтальными листами толщиной 6 мм и 14 мм соответственно.

Концевые части П-образной формы были выполнены из листов толщиной 10 мм, шкворневые балки замкнутого сечения – из вертикальных и горизонтальных листов толщиной 14 мм и 10 мм соответственно. В средней части рамы были расположены поперечные балки (швеллер $150 \times 70 \times 5$ мм). В местах установки подвагонного оборудования балки имели замкнутое сечение. Раскосы рамы переменной по длине высоты были сварены в форме двутавра из вертикальных листов толщиной 14 мм и горизонтальных листов толщиной 10 мм.

Боковые обвязки рамы П-образной формы были выполнены с отбортованными нижними горизонтальными полками, а приваренные к ним листы обшивки боковых стен формировали замкнутые сечения прямоугольной формы.

Настил пола между шкворневыми балками был выполнен из гофрированных листов толщиной 3 мм.

Боковая стена состояла из верхней обвязки специального профиля, набора равнополочных зетобразных стоек $40 \times 55 \times 3$ мм и гофрированной обшивки толщиной 3 мм.

Крыша кузова в средней части и несущий кожух-обтекатель включали в свою конструкцию одинаковые гофрированные листы толщиной 3 мм и дуги из однотипного равнополочного зетового профиля $65 \times 40 \times 3$ мм. Скаты крыши были выполнены из листов толщиной 4 мм, кожуха-обтекателя – 6 мм.

Конструкция торцевой стены включала в себя две противоударные стойки двутаврового сечения, приваренные к буферному брусу и фрамуге крыши.

Параллельно с изготовлением кузовов РТ-200 на Рижском вагоностроительном заводе началось изготовление электропоезда ЭР200 (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – Электропоезд ЭР200

Поперечное сечение кузова прицепного вагона электропоезда ЭР200 представлено на рисунке 1.14, описание кузова дано в соответствии с [70].

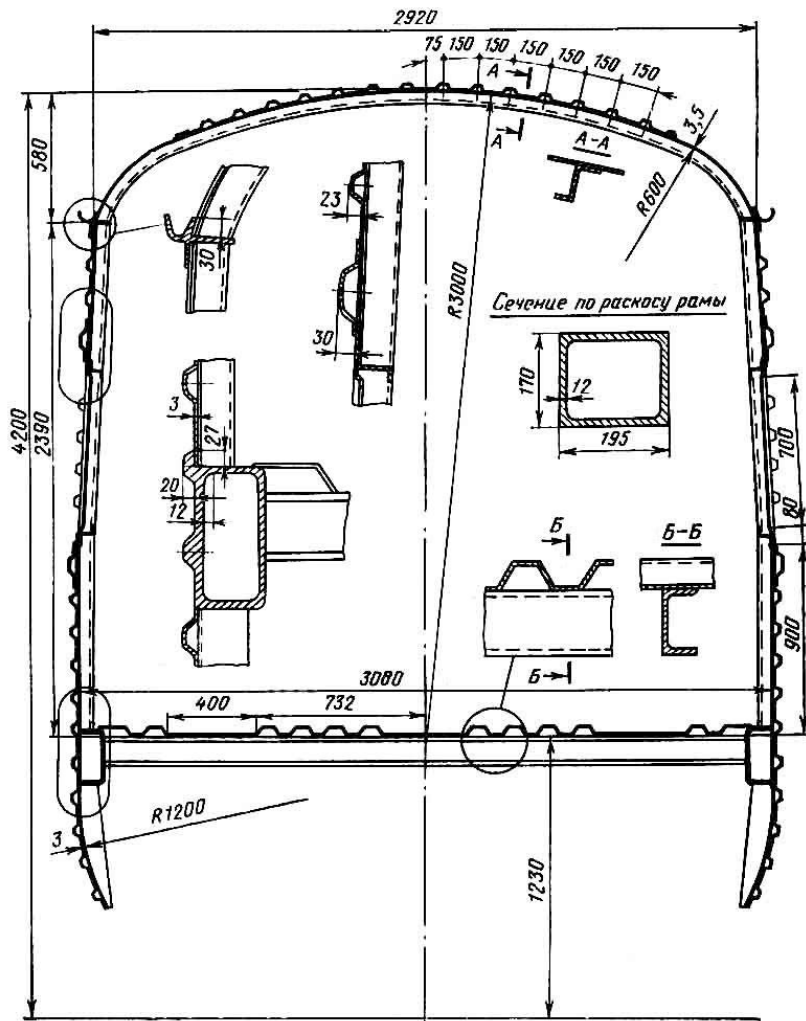


Рисунок 1.14 – Поперечное сечение прицепного вагона электропоезда ЭР200

Некоторые технические характеристики вагонов поезда ЭР200 представлены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Технические характеристики вагонов ЭР200

Параметр	Головной вагон	Вагон М/М _т [*]
Конструкционная скорость, км/ч	200	200
Масса тары, т	48,7	56,5/58,5
Масса кузова с оборудованием, т	32,38	31,3/33,2
Максимальная нагрузка на ось, т	12,8	15,8/16,1
Габарит	1-Т	1-Т
Длина по осям автосцепок, мм	26537	26614
Ширина кузова, мм	3130	3130
Высота кузова, мм	4200	4200
База вагона, мм	18800	18800
Число мест для пассажиров, шт.	24	64

^{*}М – моторный, М_т – моторный с токоприемником

Кузов вагона ЭР200 представлял собой замкнутую оболочку с вырезами для оконных и дверных проёмов. Его конструкция включала в себя следующие крупногабаритные узлы: раму, пол, крышу, боковые и торцевые стены. Сварная рама (без хребтовой балки) была собрана из двух консольных частей, двух обвязок (прессованные профили прямоугольного сечения) и набора поперечных балок. Сверху на раму устанавливался настил из гофрированных листов толщиной 2 мм, воспринимающий часть продольных усилий.

Крыша была выполнена из гофрированного листа, подкреплённого изнутри дугами, и собиралась секциями длиной около 3,5 м. Каждая секция включала в себя среднюю часть и два ската. Средняя часть состояла из двух листов толщиной 2 мм и имела 14 гофров, расположенных с шагом 170 мм. Скаты крыши для придания большей жёсткости были выполнены небольшим радиусом и выполнялись из гладкого листа толщиной 3 мм.

Боковая стена кузова вагона выполнялась из гофрированных листов толщиной 3 мм, усиленных горизонтальными и вертикальными элементами жёсткости из прессованных зетобразных профилей (за исключением верхнего продольного Т-образного обвязочного профиля).

Торцевая стена включала каркас, сваренный из прессованных профилей швеллерообразного сечения, обшитый гофрированным листом толщиной 3 мм. Каркас лобовой части головного вагона, обшитый листом толщиной 3 мм, был выполнен из прессованных профилей различных сечений, придающих ей необходимую форму. За ним, в передней части боковой стены, были установлены две сварные вертикальные балки для передачи усилия от которых на стойки боковых стен, раму и крышу под окнами была смонтирована горизонтальная балка. Применение алюминиевых сплавов в конструкции кузова вагона ЭР200 позволило уменьшить его массу на 4,5 т по сравнению со стальным кузовом таких же габаритных размеров. Следует отметить, что вагоны поезда ЭР200 – единственные отечественные пассажирские вагоны из алюминиевых сплавов, находившиеся в эксплуатации (до 2009 г.).

Подробная информация о конструктивных особенностях, а также сведения об особенностях управления, технического содержания и обслуживания поезда ЭР200 приведена в книге [70].

Отдельно следует выделить 1988 г., когда после завершения инженерно-экономических расчётов по определению перспективных направлений развития транспорта в стране в рамках научно-технической программы «Высокоскоростной экологический транспорт» началась разработка ВСМ «Санкт-Петербург – Москва» в качестве первоочередного шага к дальнейшему развитию сети ВСМ в России.

В 1991 г. была представлена концепция отечественного высокоскоростного поезда ЭС250, получившего название «Сокол» [71–72] (рисунок 1.15) (в разработке проекта принимали участие более 60 организаций и предприятий железнодорожного транспорта и оборонного комплекса).



Рисунок 1.15 – Общий вид поезда ЭС250

В период с 1992 по 1998 гг. были созданы эскизный и технический проекты, а также разработана конструкторская документация и изготовлен опытный состав.

Отечественный электропоезд по своим техническим характеристикам не уступал зарубежным высокоскоростным поездам (TGV-A, ICE, Series 300 Shinkansen) и был предназначен для перевозки пассажиров в вагонах с местами для сидения туристического и бизнес классов на расстояние до 700–800 км.

Кузова вагонов были сварены из панелей и профилей, изготовленных из алюминиевых сплавов. Длина кузова прицепного, моторного и трансформаторного вагонов – 26 м, головного – 27 м, габарит подвижного состава 1-Т позволил сделать вагон шириной по внешнему контуру 3120 мм. Кузов был разделен полом на две части: пассажирский салон и подвагонный отсек для оборудования.

Для повышенной безопасности пассажиров в каждой концевой части кузова в районе тамбура были предусмотрены «жертвенные зоны». Крыша, пол и стены кузова в этих зонах специально имели пониженную прочность. При аварийных соударениях именно в этих зонах должна была начаться деформация металла для поглощения большей части энергии удара, в то время как пассажирский салон сохранял свои геометрические размеры.

Результаты проведенных комплексных испытаний поезда подтвердили соответствие большинства показателей и характеристик требованиям технического задания, однако, имелись и принципиальные конструктивные недостатки, связанные с обеспечением безопасности движения, надёжностью и ремонтпригодностью отдельных узлов и систем оборудования [73]. Учитывая результаты контрольных испытаний, комиссия МПС не рекомендовала передачу электропоезда в эксплуатацию, а все работы по его разработке были завершены в апреле 2002 г. Подробную информацию, основанную на документальных источниках и свидетельствах действующих лиц, о проекте высокоскоростного поезда ЭС250 позволяет получить написанная в публицистическом стиле книга А. И. Гурьева [74, с. 195–217].

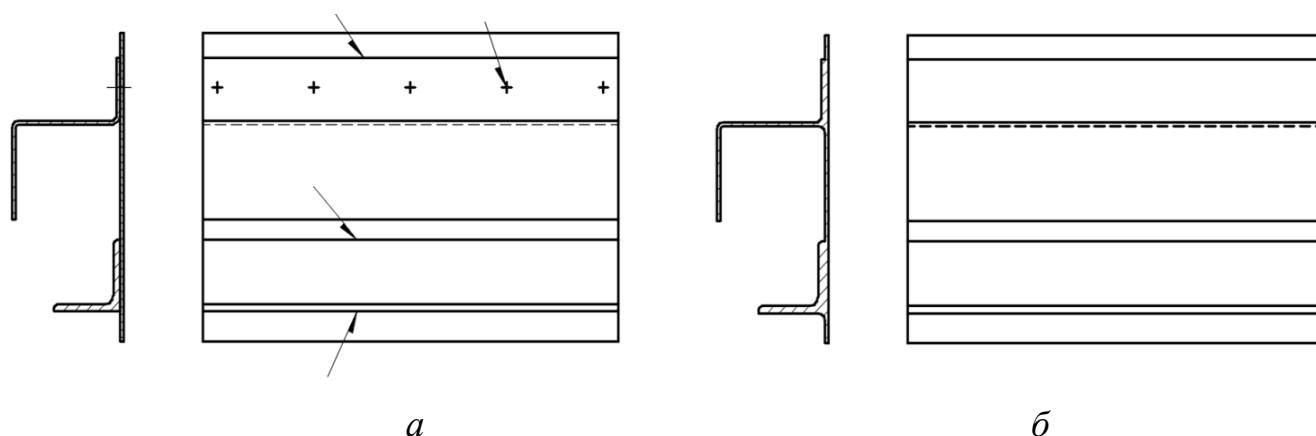
С тех пор практически никаких значимых работ в вагоностроительной отрасли, касаемых разработки и изготовления пассажирских вагонов из алюминиевых сплавов, не проводилось.

Еще одним отрицательным фактором в разработке отечественного легковесного подвижного состава явилось то, что зачастую опыт, приобретаемый в процессе проектирования и изготовления алюминиевых вагонов, не суммировался, а накапливался предприятиями отдельно.

1.3 Варианты конструкций кузова пассажирского вагона, технология их изготовления, положение дел в современном отечественном вагоностроении

В начале 60-х гг., как было упомянуто в подразделе 1.1 настоящей диссертации, возник большой интерес к использованию алюминиевых сплавов при изготовлении зарубежного железнодорожного подвижного состава, обусловленный открывающимися при этом возможностями уменьшения массы поездов и, следовательно, сокращениями потребления энергии на тягу, что особенно актуально для скоростного и высокоскоростного движения, а также пригородных электропоездов. К этому времени технология алюминия, в частности его сварки, была уже достаточно отработана, поэтому учёные и инженеры полагали, что его практическое внедрение обойдется без сколько-нибудь существенных затруднений.

В то время, ввиду отсутствия мощных прессов, изготовление крупноразмерных экструдированных элементов было практически невозможно, что накладывало ограничения на габаритные размеры деталей, которые можно было использовать в производстве подвижного состава. Из-за этого разработчики не могли применить наиболее оптимальные, новейшие и перспективные для того времени технические решения и были вынуждены копировать старые проверенные стальные конструкции. Алюминиевые конструкции такого рода получили наименование «дифференциальные» (рисунок 1.16, а).



а – дифференциальное исполнение; б – интегральное исполнение

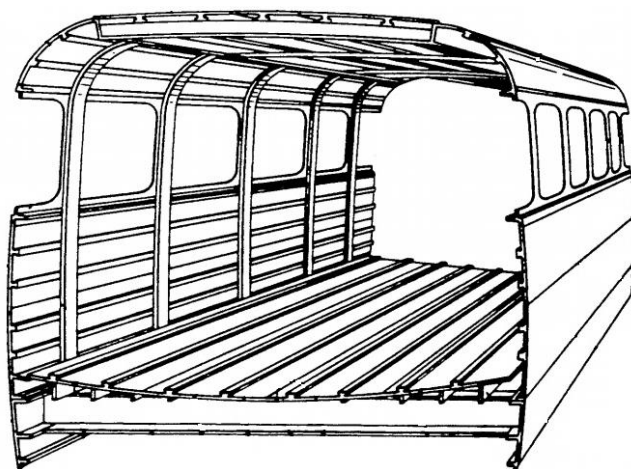
Рисунок 1.16 – Пример исполнения конструкции

С течением времени характеристики алюминиевых сплавов улучшались. Была, в частности, повышена их податливость к прессованию, поэтому в начале 70-х гг. стало возможным более полно использовать свойства алюминиевых сплавов при проектировании профилей и выборе общих конструктивных схем, лучше соответствующих материалу. Это привело к созданию так называемых «интегральных конструкций» (рисунок 1.16, б) из алюминия, которые позволяют снизить объём сварочных работ с присущими им негативными факторами (наличие дефектов, деформации и др.), получить требуемые прочностные характеристики в продольном и поперечном направлениях с использованием экономичных методов механической обработки, добиться уменьшения общего числа конструктивных элементов, повысить степень механизации остающихся сварочных и сборочных работ.

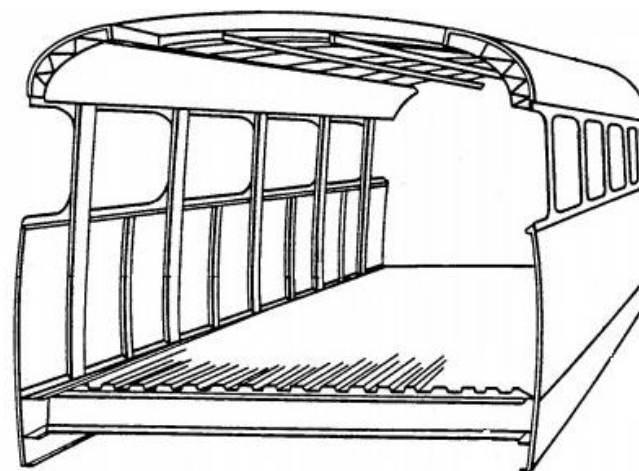
Далее кратко рассмотрим диверсификацию предлагаемых производителями интегральных и дифференциальных конструкций вариантов компоновки поперечного сечения кузовов пассажирских вагонов (рисунок 1.17) на основе анализа патентных данных за последние 40 лет (список патентов приведен в приложении А).

Здесь схема «а» – выполнение кузова пассажирского вагона традиционной конструкции из алюминиевых сплавов в дифференциальном варианте исполнения. Развитие конструкции такого типа достигло уже такой степени, что невозможно ожидать значительного снижения их веса, а также повышения прочности и жёсткости без существенного увеличения толщины деталей, а также внедрения каких-либо принципиально новых решений. Указанная схема не позволяет использовать все преимущества алюминиевых сплавов, а трудоёмкость производства высока.

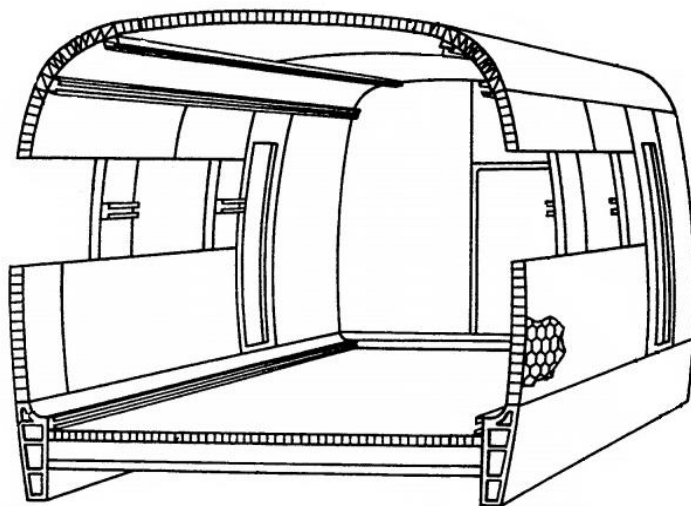
Схема «а» использовалась на ранних этапах применения алюминия и его сплавов в качестве конструкционного материала при отсутствии должного опыта работы с ним, а также технологии получения крупногабаритных трёхслойных панелей (см. схему «в») и замкнутых алюминиевых профилей.



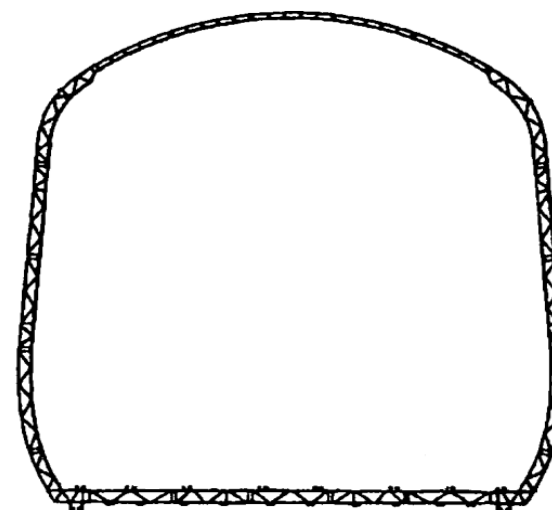
a



б



в



г

Рисунок 1.17 – Варианты компоновки поперечного сечения кузова вагона

Схема «б» – сочетание традиционной конструкции и интегрального исполнения отдельных элементов, деталей или узлов (на рисунке – обвязка и скат кузова выполнены панелью, внешние элементы которой подкреплены «перемычками»).

Схема «в» – революционный этап в развитии конструкций кузовов пассажирских вагонов при использовании конструкционных материалов, отличных от сталей. Здесь поперечное сечение кузова, за исключением рамы, состоит из панелей. Каждая панель представляет собой конструкцию, включающую прочные тонкие внешние слои и менее прочную, но лёгкую сердцевину (промежуточный слой для обеспечения заданного расстояния между внешними слоями и вовлечения их в совместную работу, в качестве которой могут использоваться неармированные и армированные пенопласты, сотовые конструкции и коробчатые элементы, ребра). Применение указанных панелей, обладающих хорошими вибродемпфирующими характеристиками, позволяет при малом весе обеспечить высокую прочность, жёсткость и звукоизоляцию.

Одними из первых разработок, в которых была использована указанная схема, являлись проекты пригородных вагонов США, Англии и Германии.

В качестве примера приведём изготовленные в 1962 г. вагоностроительной фирмой «MAN» (ФРГ) при сотрудничестве с химической фирмой «Bayer» два моторных вагона дизель-поезда (рисунок 1.18). Длина вагона 16 м, база – 9 м. Вагон имел 72 места для сидения.

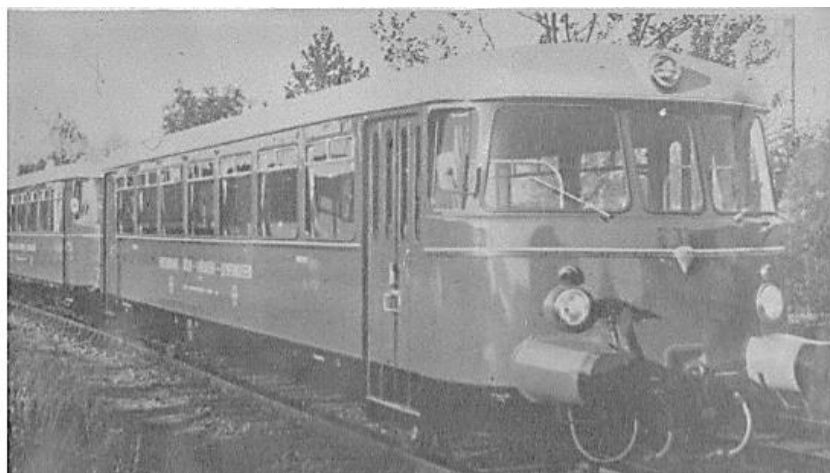


Рисунок 1.18 – Дизель-поезд, изготовленный фирмами «MAN» и «Bayer»

Кузов не имел обычного каркаса, а необходимая жёсткость достигалась применением трёхслойной конструкции. Оболочка кузова состояла из 10 продольных

трёхслойных панелей. В качестве внешних слоёв панелей применялся алюминиевый сплав, в качестве заполнителя – жёсткий пенополиуретан с фирменным названием «Молтопрен». Толщина сердцевины – 40 мм. Крыша и пол состояли из трёх продольных панелей (рисунок 1.19), которые соединялись между собой при помощи фасонных элементов и вместе с боковыми панелями формировали конструкцию с высоким сопротивлением скручиванию, срезу и сжатию. Для соединения блоков использовалось зажимное крепление, при котором Z-образные кромки блоков вдвигались в пазы и фиксировались винтами. Для крепления деталей внутреннего оборудования в полости конструкций перед заливкой сердцевины закладывались металлические элементы.

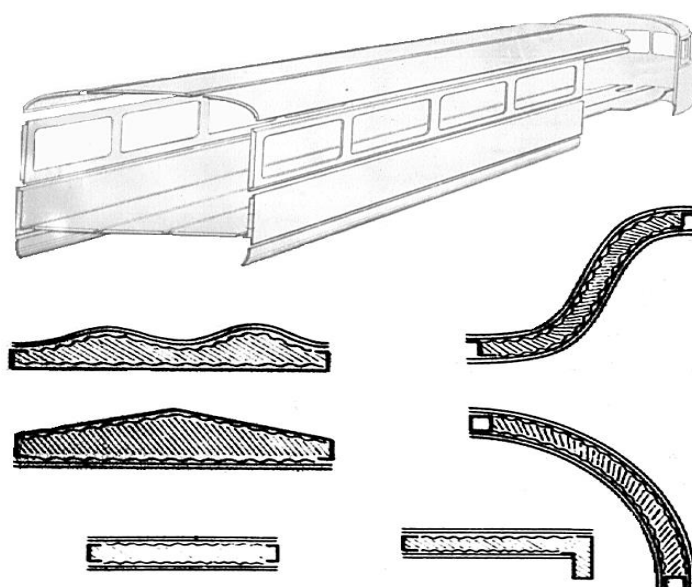


Рисунок 1.19 – Поперечное сечение дизель-поезда, изготовленного фирмами «MAN» и «Bayer» и конфигурация панелей для его формирования

Применение трёхслойных элементов в конструкции кузова позволило снизить его вес (на 46 % по сравнению со стальным вариантом кузова), устранить необходимость в правке, ввиду отсутствия деформации, вызванной сваркой, обеспечить в эксплуатации быструю замену частей несущей конструкции.

При формировании схемы «в» могут использоваться следующие методы изготовления: склеивание, вспенивание, компрессионно-вакуумный.

Метод склеивания технологически включает следующие операции: раскрой материалов, подготовка поверхностей элементов перед склеиванием, приготовление клеев и подслоев и нанесение их на склеиваемые поверхности, сборка и

обжатию панели, обработка и отделка панели после склеивания, контроль качества. При этом внешние слои, помимо алюминия, могут быть изготовлены из стали или стеклопластика, а сердцевина – из композитных материалов либо включать конструкции из сот или гофр.

Метод вспенивания (под действием тепла или проведения химической реакции) – один из наиболее простых и удобных. Технологический процесс обычно состоит из следующих операций: предварительная сборка трёхслойной конструкции, нанесение клея на внутреннюю поверхность, равномерное распределение расчётного количества размельчённого полуфабриката, полная сборка трёхслойной конструкции (операции склеивания, сварки или клёпки), вспенивание и отверждение среднего слоя.

Основной особенностью компрессионно-вакуумного метода является совмещение операций пропитки материала внешних слоёв и приклейки к ним внутреннего слоя (рисунок 1.20).

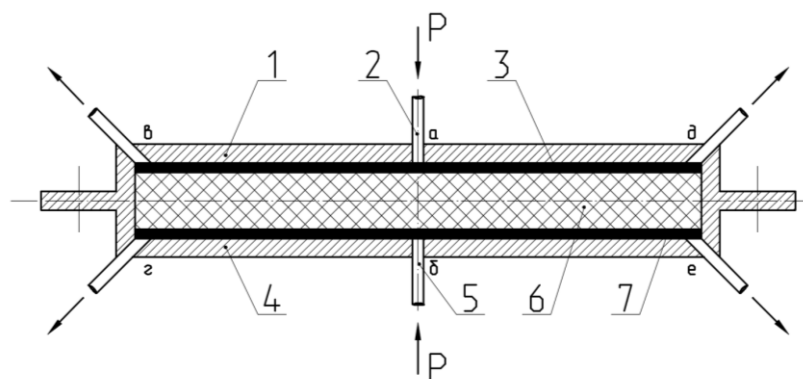


Рисунок 1.20 – Компрессионно-вакуумный метод получения трёхслойных панелей

На нижней полуформе 4 располагается материал внешнего слоя 7, на который укладываются готовые блоки сердцевины 6 и материал внутреннего слоя 3. Затем устанавливается вторая полуформа 1, а по трубкам 2, 5 в зонах «а» и «б» производится подача смолы (либо иного связующего компонента в соответствии с технологией изготовления). В зонах «в», «г», «д», «е» создаётся вакуум, благодаря чему ускоряется пропитка армирующего материала верхнего и нижнего слоёв. Весь процесс длится до полной пропитки материалов.

Указанный метод имеет ряд преимуществ перед методами склеивания и вспенивания (высокое качество наружных слоёв, хорошая адгезия сердцевины

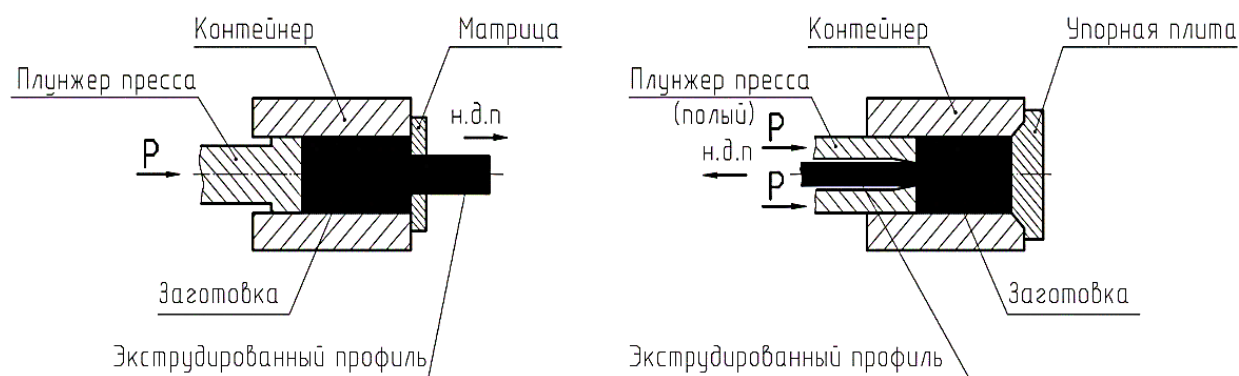
к внешним слоям, повышение производительности, улучшение условия труда рабочих), но оправдывает себя лишь при использовании в серийном производстве, ввиду необходимости точного изготовления полуформ и их пригонки друг к другу.

Кроме того, при изготовлении деталей и узлов необходимо строгое соблюдение технологии изготовления для избежания трудноустраняемых внутренних дефектов (воздушные включения, расслоение, посторонние включения, пористость, образование раковин, незаполнение пространства панели, отсутствие адгезии между внешними и внутренними слоями).

Переход от схемы «в» к схеме «г», позволяющей значительно упростить технологический процесс сборки кузова, стал возможным за счёт существенного усовершенствования около 20 лет назад технологии прессования алюминия [75] и применения сварки трением с перемешиванием (СТП) [76–78] (метод изобретен в 1965 г. в СССР [79], реализован и доработан Британским институтом сварки (TWI) в 1991 г. [80]).

Приведём кратко общие сведения об указанных технологиях.

Прессование (холодное или горячее) – технологический процесс пластической деформации заготовки под действием пресса. Выделяют два основных вида прессования – прямое и обратное (рисунок 1.21), включающие различные способы (например, прессование через язычковые (мостиковые) матрицы, с плавающей или закреплённой иглой и др.).



*а – прямое прессование; б – обратное прессование
(н. д. п. – направление движения профиля)*

Рисунок 1.21 – Виды прессования

Наиболее применимым методом прессования алюминия и его сплавов, является прямой процесс, при котором направление течения металла соответствует направлению движения плунжера пресса (в обратном прессовании матрица на переднем конце полого плунжера пресса двигается по отношению к контейнеру, при этом направление течения металла и направление движения плунжера пресса противоположны). Вопросы изготовления экструдированных панелей рассмотрены в полном объеме в книге [75]. В качестве описания процесса изготовления и примера экструдированной панели для вагоностроения можно привести патент [81].

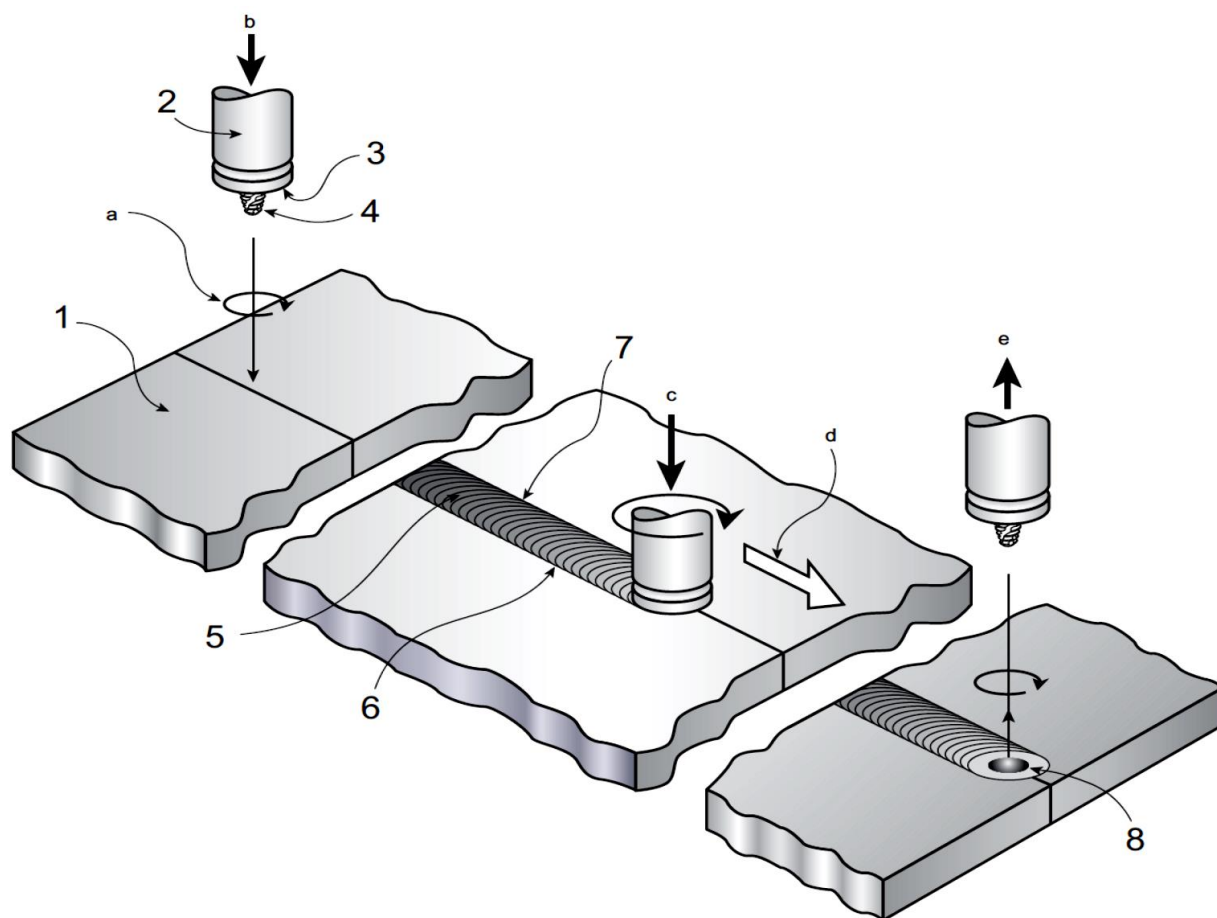
СТП является одним из видов сварки давлением. Физически он представляет собой процесс нагрева деталей путём преобразования механической энергии в теплоту, благодаря работе сил трения с последующим смешиванием материалов (в том числе – разнородных) свариваемых деталей.

На настоящий момент в РФ отсутствует ГОСТ на СТП. Производители используют международный стандарт ISO 25239 [82–86], который не устанавливает строгих требований к технологии СТП. Научными организациями и производителями СТП постоянно ведутся исследования, направленные на улучшение структуры шва (зависит от рабочего инструмента, его частоты вращения, прилагаемого к нему усилия, длительности приложения усилия и т. д.) (это является причиной большого количества патентов в данной области), а собственные наработки являются коммерческой тайной. Преимуществами СТП перед другими видами сварки является отсутствие токсичных испарений, отсутствие в необходимости дополнительных расходных материалах (флюсов, сварочной проволоки и др.), подготовки кромок соединения (за исключением обезжиривания и очистки) и обработки шва после соединения, возможность получения однородной структуры шва. Основным недостатком СТП являются стационарность и громоздкость применяемого оборудования.

Принципиальная схема процесса и внешний вид получаемых сварных швов представлены на рисунке 1.22.

На рисунке 1.23 представлены котёл вагона-цистерны для концентрированной азотной кислоты для АО «ТихвинХимМаш», сваренный СТП на предприятии

ЗАО «Сеспель» (алюминий марки АД0, толщина листов 28 мм), набор сварочных инструментов для алюминиевых сплавов разных марок и толщин, применяемый на предприятии, а также этап процесса сварки котла (карта 9200×8300 мм).



1 – свариваемые детали; 2 – инструмент; 3 – запlechик инструмента;
 4 – наконечник инструмента; 5 – сварной шов (лицевая сторона); 6 – сторона отхода;
 7 – сторона набегания; 8 – выходное отверстие;
 а – направление вращения; b – движение инструмента вниз; с – вертикальная (осевая) сила;
 d – направление движения инструмента (направление сварки);
 e – движение инструмента вверх

Рисунок 1.22 – Принципиальная схема СТП и внешний вид сварных швов



Рисунок 1.23 – Котёл вагона-цистерны, набор сварочного инструмента и этап сварки карты котла

На рисунке 1.24 представлены установки СТП ООО «ЭСАБ».



Рисунок 1.24 – Установки СТП ООО «ЭСАБ»

При проведении работ по внедрению алюминиевых сплавов как конструкционных материалов в пассажирское вагоностроение и производству отечественного алюминиевого вагона должны быть проведены исследования по развитию нормативной базы, по проверке соответствия вновь разрабатываемых конструкций требованиям, предъявляемым действующими стандартами, по подтверждению экономической целесообразности (рисунок 1.25).

При этом должен быть учтён опыт проектирования более развитых с этой точки зрения стран, а нормативная база, действующая в настоящее время, должна быть расширена и усовершенствована.

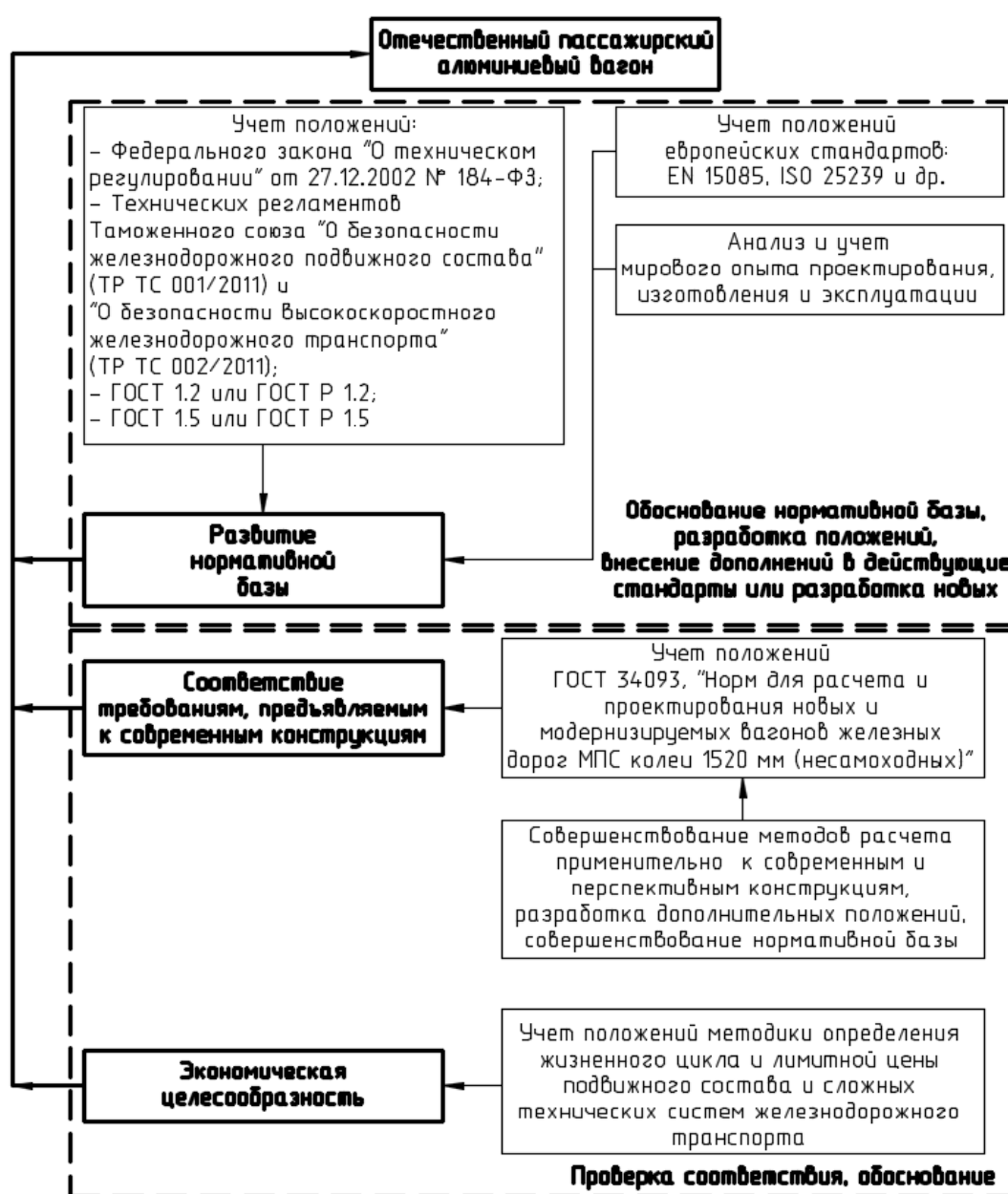


Рисунок 1.25 – Схема работ по внедрению алюминиевых сплавов как конструкционных в отечественное пассажирское вагоностроение

Также большое внимание при освоении серийного производства отечественных пассажирских алюминиевых вагонов должно быть уделено выбору сплава.

До недавнего времени в РФ, несмотря на широкую номенклатуру алюминиевых профилей (таблица 1.8), подходящих для применения в вагоностроении, отсутствовали стандарты на изготовление крупногабаритных полых экструдированных панелей.

Таблица 1.8 – Перечень стандартов на алюминиевые профили

Наименование профиля	Государственный стандарт
Профили зетового сечения	ГОСТ 13619, ГОСТ 13620, ГОСТ Р 50067
Профили уголкового сечения	ГОСТ 13618, ГОСТ 13737, ГОСТ 13738, ГОСТ Р 50077
Профили двутаврового сечения	ГОСТ 13621, ГОСТ 29303
Профили таврового сечения	ГОСТ 13622, ГОСТ 29296
Профили швеллерного сечения	ГОСТ 13624, ГОСТ Р 50066, ГОСТ 13623
Профили таврошвеллерного сечения	ГОСТ 17575
Профили трапециевидного отбортованного сечения	ГОСТ 17576
Профили радиусные полосообразного сечения	ГОСТ Р 55395

В настоящее время АО «ВНИИЖТ» совместно с Ассоциацией «Объединение производителей, поставщиков и потребителей алюминия», а также АО «Арконик СМЗ» и Объединённой компанией «РУСАЛ» заканчивают разработку национального стандарта «Алюминий и алюминиевые сплавы. Полуфабрикаты для производства элементов кузовов подвижного состава железнодорожного транспорта. Технические условия и сортамент», который позволит перейти к проектированию и изготовлению отечественного подвижного состава, а также организовать производство прессованных профилей для кузовов поездов «Сапсан», «Ласточка», «Стриж» и аналогичным им.

Также АО «ВНИИЖТ» разработал проект национального стандарта «Соединения сварные конструкций кузовов железнодорожного подвижного состава из алюминиевых сплавов. Требования к проектированию, изготовлению, ремонту и контролю качества», который направлен на совершенствование технических

характеристик отечественного подвижного состава при использовании алюминиевых сплавов в качестве основных конструкционных материалов.

Таким образом, был проанализирован и учтён мировой опыт проектирования, изготовления и эксплуатации в части выбора алюминиевого сплава и формирования в виде нормативной базы требований, предъявляемых к изготовителю экструдированных панелей, а также приведены рекомендации для проектантов подвижного состава.

Примерами предприятий в РФ, которые могут осуществлять выпуск крупногабаритных экструдированных панелей для пассажирского вагоностроения, являются АО «Волжская металлургическая компания» (г. Жигулёвск), корпорация ВСМПО-АВИСМА (г. Верхняя Салда), ОАО «КУМЗ» (г. Каменск-Уральский).

Примерами предприятий в РФ, имеющими возможность осуществлять СТП либо проектировать оборудование и оснастку для её выполнения, являются ООО «ЭСАБ», ЗАО «Сеспель».

Ниже приведены некоторые работы отечественных и зарубежных учёных и инженеров, которые должны быть учтены, а подходы и методы, предложенные и рассмотренные в них – приняты во внимание при формировании нормативных требований и рекомендаций к алюминиевым конструкциям современного, перспективного подвижного состава.

Исследованиям в области совершенствования несущих конструкций кузовов вагонов (как пассажирских, так и грузовых) в том числе изготовленных с применением конструкционных материалов, отличных от стали, посвящены работы учёных ряда научных организаций: РУТ (МИИТ) – Л. А. Шадур [87], В. Н. Котуранова [88–90], С. В. Беспалько [91–92], В. Н. Филиппова [93–94], Н. Н. Воронина [95–96], Г. И. Петрова, М. Н. Овечникова, П. Г. Проскурнева, А. П. Азовского, М. П. Козлова, С. В. Вершинского и др.; ВНИИЖТ – Ю. М. Черкашина [109], Ю. С. Ромена [97–98], А. М. Соколова, А. М. Краснобаева [99–100], С. С. Барбарича и др.; УрГУПС (УЭМИИТ) – К. М. Колясова, А. Э. Павлюкова, В. Ф. Лапшина, А. В. Смольянинова, Н. С. Бачурина и др.; БелГУТ – А. В. Пигунова [101]; ИрГУПС (ИриИТ) – Л. Б. Цвика и др.; КВСЗ – В. И. Приходько [102],

О. А. Шкаброва и др.; ВНИКТИ – Э. С. Оганьяна, Г. М. Волохова и др.; РГУПС (РИИЖТ) – О. А. Ворона; ЗАО НО «ТИВ» – А. А. Юхневского, А. Н. Скачкова, С. Л. Самошкина, В. В. Василевского, П. С. Ломакова, Д. И. Гончарова, С. Д. Коршунова [103–108] и др.; БГТУ (БИТМ) – В. В. Кобищанова [110–111], В. П. Лозбинева [112–113], Ф. Ю. Лозбинева, М. В. Боброва, А. А. Милаковой, А. А. Ольшевского, Д. Я. Антипина [114–116], Е. Н. Никольского [122] и др.; ПГУПС (ЛИИЖТ) – Ю. П. Бороненко [117–118], А. В. Третьякова [119], А. М. Орловой, М. М. Соколова [120], А. А. Битюцкого [121], Н. А. Битюцкого и др.

Среди зарубежных учёных можно выделить работы [123–128], включающие общие принципы статических расчётов, а также направленные на улучшение характеристик пассажирского подвижного состава, в том числе путём совершенствования конструкций экструдированных панелей и сплавов, применяемых при их производстве.

Выводы по разделу 1

1 На основе анализа зарубежного и отечественного опыта изготовления пассажирских вагонов с кузовами из алюминиевых сплавов можно сделать следующие выводы:

- развитие конструкций кузовов пассажирских вагонов характеризуется постоянным усложнением ввиду необходимости повышения комфорта для пассажиров и обслуживающего персонала, а также удовлетворения требованиям технической эстетики, поэтому у проектировщиков и изготовителей подвижного состава возникает необходимость в снижении их массы;

- для современного стального отечественного пассажирского вагона, ввиду проводимой годами существенной оптимизации его конструкции, в настоящее время отсутствует возможность его дальнейшего значительного облегчения;

- алюминиевые сплавы имеют ряд существенных преимуществ по сравнению со сталями: меньшая объемная масса, меньший модуль упругости (а,

следовательно, более высокая энергоёмкость конструкции при действии ударных нагрузок), высокая пластичность, высокая удельную прочность и др.;

- эффективность внедрения алюминиевых сплавов, как конструкционного материала, заменяющего сталь, подтверждена опытом их применения за рубежом;

- применение алюминиевых сплавов позволит существенно повысить технологичность кузова: вследствие использования экструдированных алюминиевых панелей для формирования поперечного сечения кузова появляется возможность к повышению степени унификации деталей и сборочных единиц, снижению объема сварочных работ и работ по правке кузова, применению не реализованной в настоящее время крупноблочной сборке внутреннего оборудования.

2 На основе информации о текущей готовности предприятий РФ осуществлять проектирование или производство кузовов пассажирских вагонов из алюминиевых сплавов можно сделать следующие выводы:

- в настоящее время в РФ существуют предприятия из области применения СТП, экструзии алюминиевых профилей, использующие собственные разработки, способные, совместно с производителями подвижного состава, обеспечить сопровождение изготовления кузовов пассажирских вагонов из алюминиевых сплавов;

- в настоящее время в РФ отсутствуют технические стандарты (разработаны проекты, находящиеся на согласовании), необходимые для проектирования, производства и последующей эксплуатации пассажирских вагонов с кузовами из алюминиевых сплавов, что является одной из причин в необходимости закупки зарубежного подвижного состава;

- разработка отечественного пассажирского вагона с кузовом из алюминиевых сплавов является актуальной задачей, при этом проектные организации и предприятия-изготовители должны работать совместно, а не накапливать опыт работ с алюминиевыми сплавами в конструкции кузовов пассажирских вагонов отдельно.

2 РАЗРАБОТКА КУЗОВА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА С ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ, СФОРМИРОВАННЫМ ИЗ ЭКСТУДИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПАНЕЛЕЙ

Так как вагоны имеют длительный срок службы, то вновь создаваемые конструкции должны удовлетворять не только существующим, но и перспективным условиям эксплуатации. Правильный выбор параметров обеспечивает безопасность движения поездов и наименьшие затраты на перевозку пассажиров и эксплуатацию вагонов.

Современный пассажирский вагон должен быть оснащён новыми техническими средствами, обеспечивающими безопасность движения (например, крэш-системами) и высокий уровень комфорта для пассажиров, что, несомненно, увеличит его массу. Применение же алюминиевых сплавов в пассажирском вагоне позволяет решить проблему осевых нагрузок.

Введение алюминиевых сплавов как конструкционных при проектировании и изготовлении кузовов пассажирских вагонов позволит получить требуемые характеристики прочности и жёсткости в продольном и поперечном направлениях, которые будут не хуже соответствующих характеристик современных стальных отечественных вагонов, находящихся и поступающих в эксплуатацию. Кроме того, как было упомянуто выше, это позволит повысить технологичность конструкции путём значительного снижения сварочных работ и работ по правке кузова за счёт применения крупногабаритных элементов, получаемых методом экструзии.

В настоящее время основные узлы кузовов пассажирских вагонов (рама с полом, боковые стены, крыша) изготавливаются из углеродистых или нержавеющей сталей. При этом листы обшивки подкрепляются элементами продольного и поперечного набора. Размеры стальной обшивки и подкрепляющих элементов подбираются из условия выполнения соответствующих требований при действии нормативных нагрузок [129, 130].

На кузов вагона, кроме продольных сил, действуют и значительные поперечные нагрузки, приводящие к возникновению существенных напряжений и

деформаций. Наиболее опасными являются поперечные нагрузки, действующие на боковые стены и крышу при аварийных ситуациях. Это приводит к необходимости находить различные способы повышения поперечной жёсткости узлов стальных кузовов.

2.1 Описание объекта исследования

Ввиду отсутствия серийных отечественных вагонов с кузовами из алюминиевых сплавов в качестве объекта исследования принята разработанная конструкция кузова пассажирского вагона, поперечное сечение которого сформировано из экструдированных алюминиевых панелей.

Расположение окон, внутреннего и подвагонного оборудования приняты аналогично серийному пассажирскому вагону купейного типа модели 61-4440 производства ОАО «ТВЗ» [131] (масса кузова – 12,8 т, пассажировместимость – 36 человек).

Кузов разработанного вагона представляет собой цельнометаллическую несущую конструкцию типа замкнутой оболочки с вырезами для окон и дверей с поперечным сечением, сформированным из экструдированных алюминиевых панелей и вписанным в габарит 1-ВМ ГОСТ 9238 (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Кузов объекта исследования (тамбурные перегородки не показаны)

Поперечное сечение объекта исследования (рисунок 2.2) предлагается выполнить из трёх типов экструдированных панелей:

- прямолинейной (1, рисунок 2.2) (продольные панели рамы, боковых стен, крыши);
- угловой прямолинейной (2, рисунок 2.2) (переходный элемент для соединения рамы с боковыми стенами);
- криволинейной (3, рисунок 2.2) (переходный элемент для соединения боковых стен с крышей).

Прямолинейные панели аналогичны по габаритным размерам профилю НП4378 (см. подраздел 2.4) производства ОАО «КУМЗ».

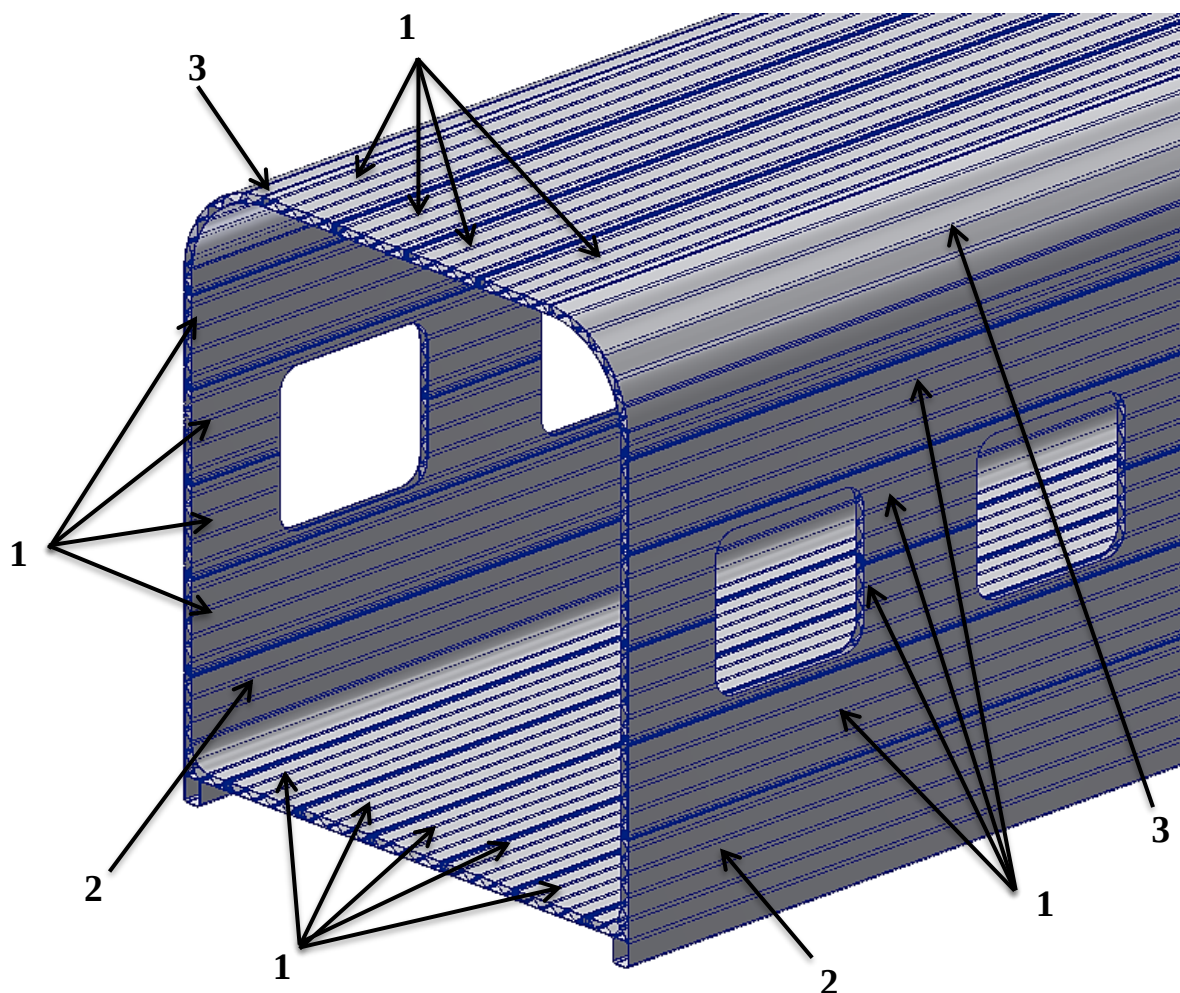


Рисунок 2.2 – Среднее сечение объекта исследования

Рама кузова выполнена без сквозной хребтовой балки (рисунок 2.3).

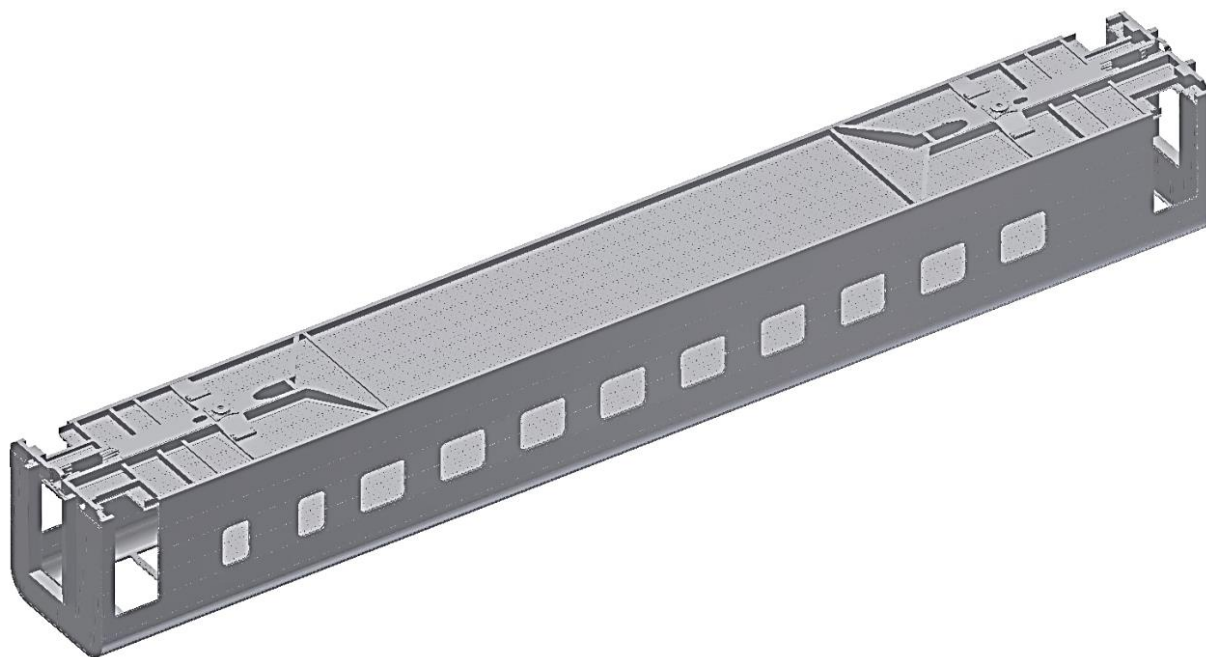


Рисунок 2.3 – Объект исследования, вид снизу

В консольных частях она включает в себя два прессованных прямоугольных равнополочных профиля швеллерного сечения длиной 5500 мм размерами 300×100 мм (толщина полок профиля – 12 мм, стенки – 10 мм) (профиль 440504 по ГОСТ 13623) (1, рисунок 2.4), перекрытых на длине 3300 мм листом толщиной 10 мм (2, рисунок 2.4).

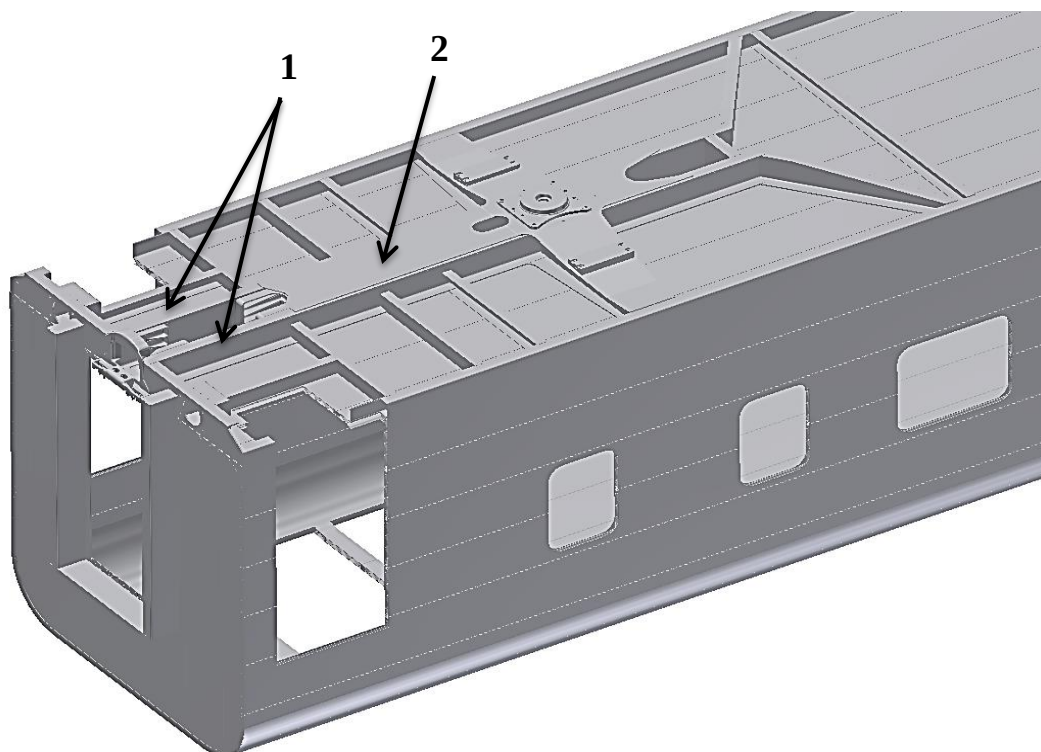


Рисунок 2.4 – Консольная часть объекта исследования

Буферные брусья выполнены из аналогичного профиля.

Раскосы (1, рисунок 2.5), установленные для лучшего распределения сжимающих и растягивающих усилий, также изготовлены из профиля 440504 по ГОСТ 13623, но выполнены переменными по высоте (от 300 мм до 140 мм).

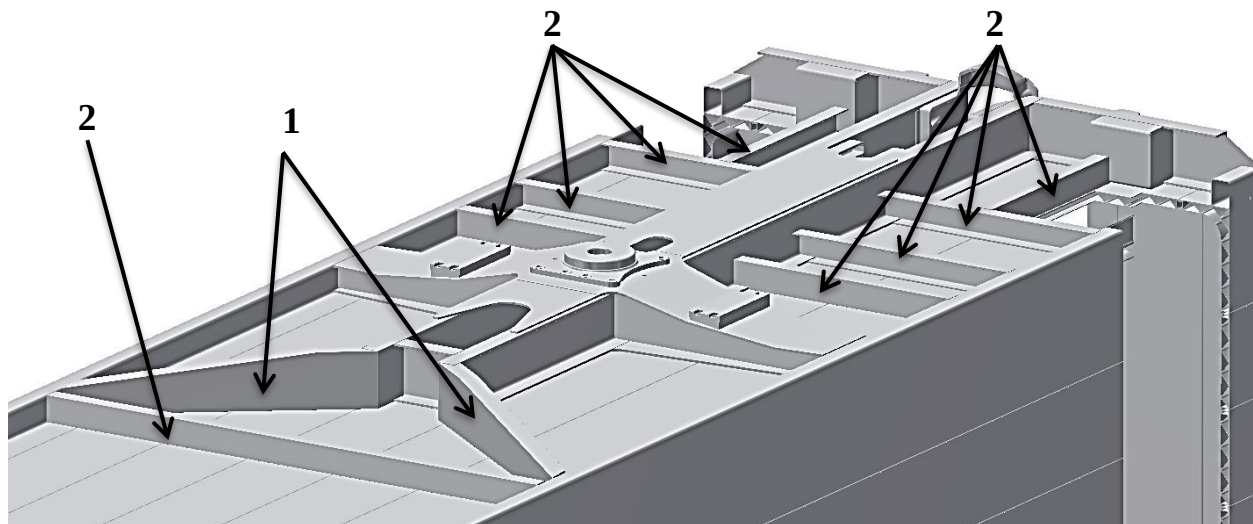
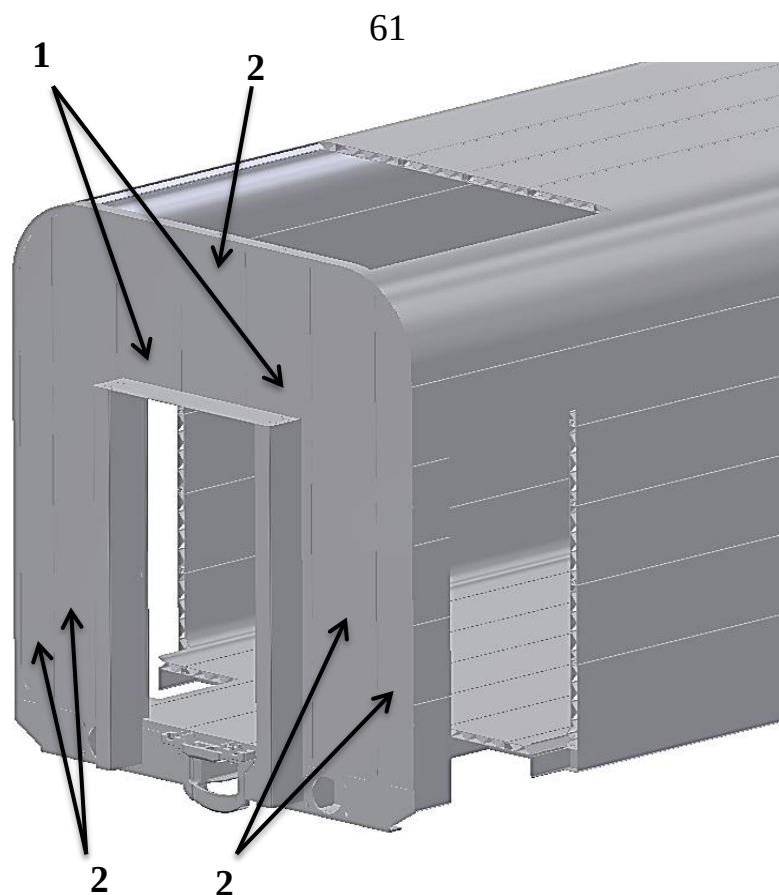


Рисунок 2.5 – Раскосы, продольные и поперечные балки консоли рамы

Шкворневые балки имеют переменное коробчатое сечение (толщина горизонтальных и вертикальных листов – 12 мм). Общие габаритные геометрические размеры шкворневых балок соответствуют размерам шкворневых балок рамы вагона модели 61-4440.

В качестве поперечных, а также продольных балок, обрамления вырезов под подножки рамы применены прессованные прямоугольные равнополочные профили швеллерного сечения размерами 140×80 мм (толщина полок и стенки профиля – 8 мм) (профиль 440472 по ГОСТ 13623) (2, рисунок 2.5).

Торцевая стена (рисунок 2.6) сформирована из прямолинейных экструдированных панелей (2, рисунок 2.6) аналогично поперечному сечению. При этом две главные стойки, которые должны быть установлены в целях обеспечения безопасности в концевой части вагона в соответствии с п. 5.11 [129], выполнены заодно с панелями, обрамляющими дверной проём торцевой двери (1, рисунок 2.6). Элементы этих панелей, кроме части панелей, имитирующих стойки, не выходят за плоскость стенок буферных брусьев.



**Рисунок 2.6 – Торцевая стена объекта исследований
(тамбурная перегородка не показана)**

Предполагается, что для соединения экструдированных панелей (вариант соединения приведен на рисунке 2.7), формирующих поперечное сечение, а также панелей торцевой стены между собой применяется СТП. При этом смежные панели имеют выступы и пазы для их позиционирования.

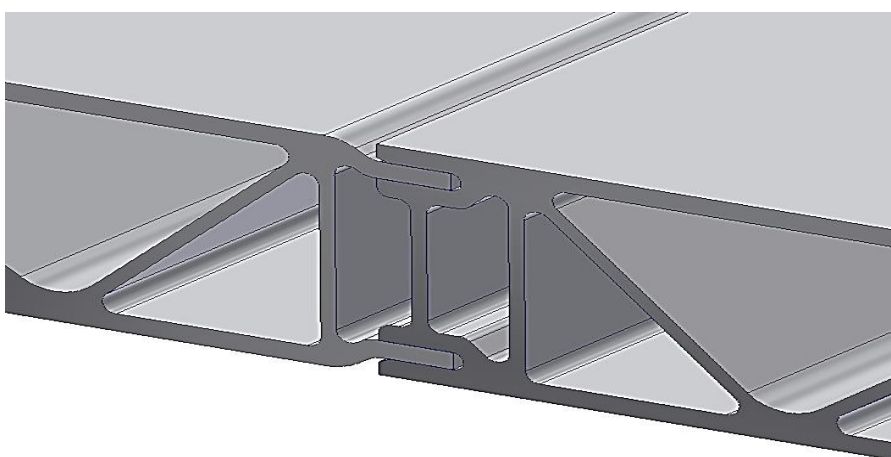


Рисунок 2.7 – Соединение панелей

С целью сокрытия внутренних полостей экструдированных панелей в торцевой стене введены заглушки (рисунок 2.8, выделены чёрным), привариваемые

по периметру.

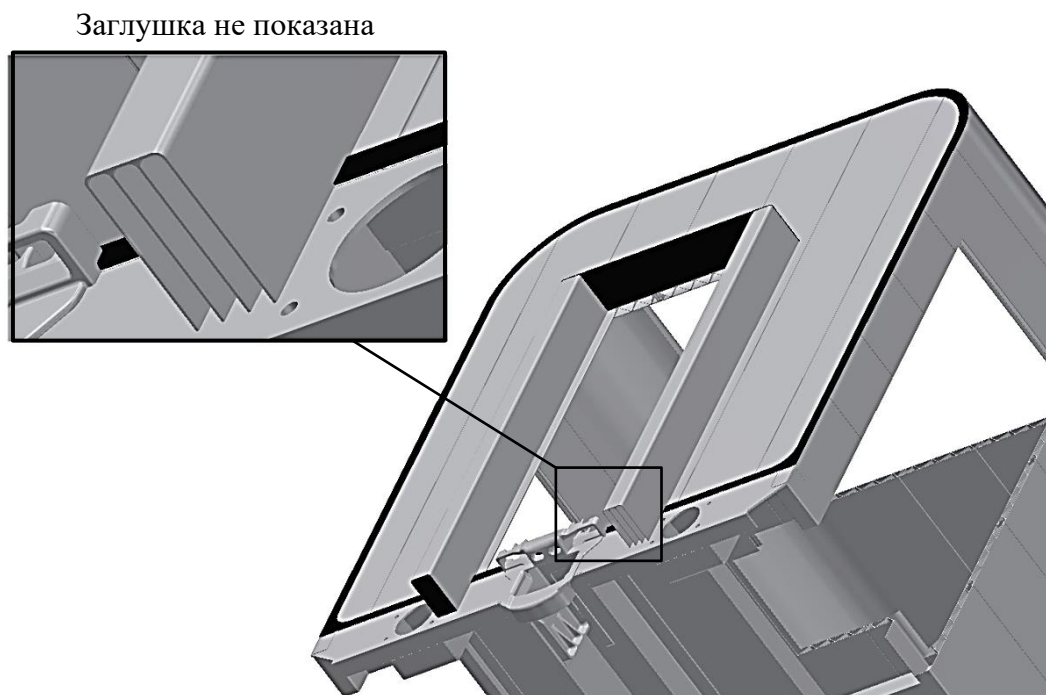


Рисунок 2.8 – Заглушки торцевой стены

Для установки торцевых стен, заглушек, соединения рамы и кузова применяется полуавтоматическая дуговая сварка в среде защитного газа.

В качестве тамбурных перегородок использована конструкция из зетов $35 \times 40 \times 50 \times 4$ мм и уголков $30 \times 40 \times 4$ мм, габаритные размеры которой соответствуют стальным конструкциям, применяемым в серийном производстве отечественных пассажирских вагонов.

При дальнейшей, более подробной разработке конструкции, необходимо избегать сварных соединений «сталь-алюминий» с целью упрощения технологии изготовления кузова, однако, при необходимости они могут быть осуществлены [132].

Предполагается, что передние и задние упоры автосцепного оборудования установлены на заклёпки. Для защиты от контактной коррозии в местах соединения алюминиевых и стальных деталей предлагается использование защитных покрытий [133, 134]. В качестве доказательства общей коррозионной стойкости алюминиевого кузова при использовании сплава 1915 можно привести обследование технического состояния электропоезда ЭР-200, проведённое АО «ВНИИЖТ» в

2002 г. (спустя 28 лет эксплуатации практически отсутствовали коррозионные повреждения [135]).

Материалы, применённые в конструкции объекта исследования, и их механические характеристики приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Материалы и их механические характеристики

Марка алюминиевого сплава	σ_B , МПа	σ_T^6 , МПа
1915T1 (рама – буферный брус, шкворневая балка, поперечные и продольные балки)	373	245
АД31Т1 (пол, боковые стены, крыша, торцевые стены, перегородки)	196	147

Возможность применения указанных материалов, в том числе в части обеспечения хорошей или удовлетворительной свариваемости, подтверждена наличием положительного опыта эксплуатации подвижного состава за рубежом, а также применением в опытных отечественных конструкциях пассажирских вагонов [134, 136].

2.2 Предварительная проверка соответствия кузова требованиям нормативной документации

На рисунке 2.9 приведена схема разработки пассажирского вагона. При этом проектантами подвижного состава, с учётом условий минимизации массы, СЖЦ и т. д., должно быть обеспечено, с одной стороны, выполнение требований нормативной документации, с другой – комфорта и безопасности пассажиров [137].

В случае разработки алюминиевого вагона с конструкцией, отличной от традиционной, перед инженерами может возникнуть ряд вопросов, требующих изменения, расширения или дополнения существующей нормативной базы. Это относится, например, к обеспечению безопасности пассажиров в аварийной ситуации, ведь пункты 5.3, 5.4, 5.6 [130] предполагают наличие в кузове вагона дуг и

⁶ Условный предел текучести

стоек [138].

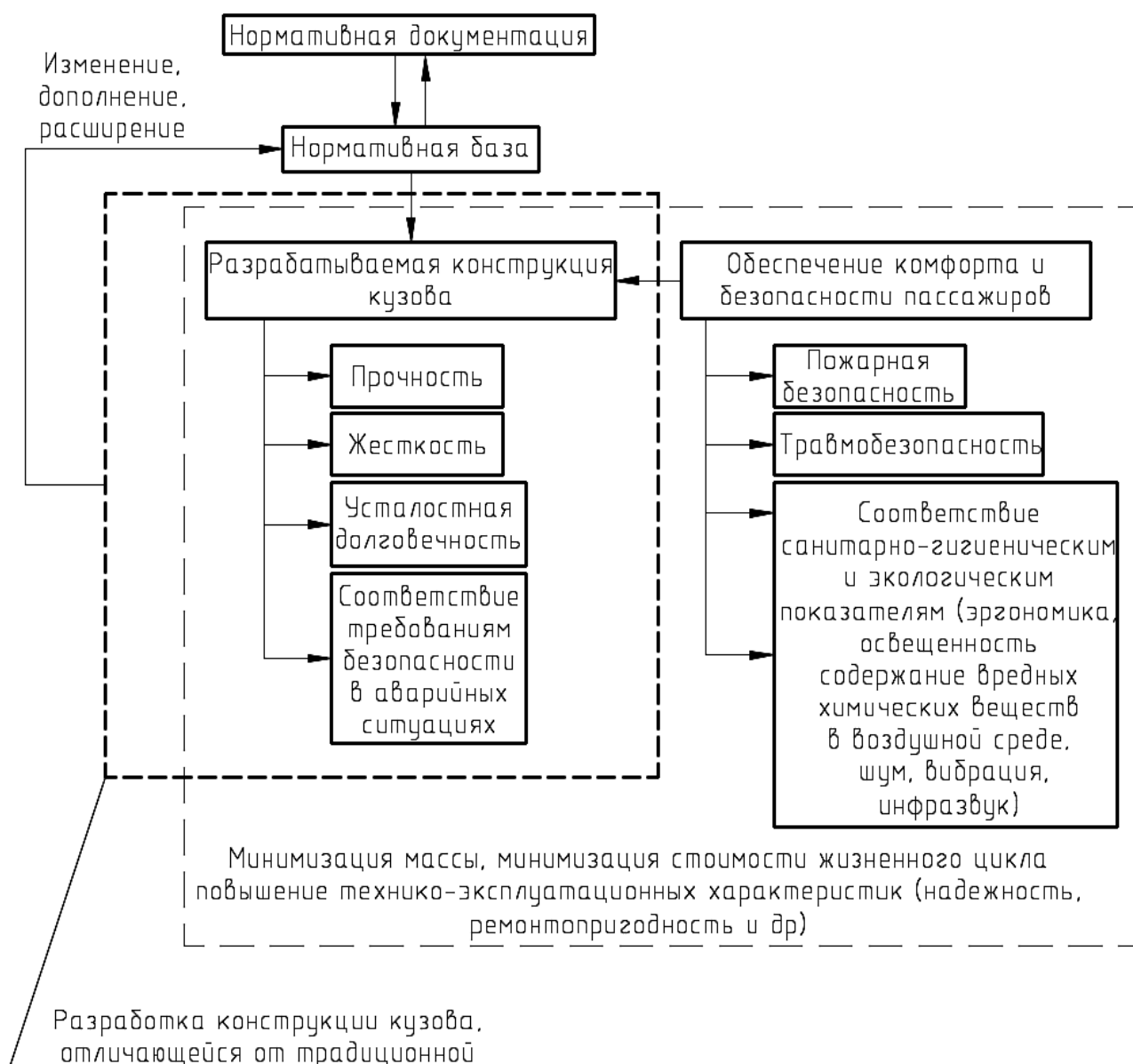


Рисунок 2.9 – Разработка пассажирского вагона

Для подтверждения соответствия разрабатываемого вагона вышеуказанным требованиям может быть использован подход, описанный в [139] (рисунок 2.10).

В соответствии с ним при введении допущения о восприятии элементами поперечного набора, работающими в упругой стадии, аварийных нагрузок, определены силы, действующие на дуги крыши и стойки вагона традиционной конструкции при $\sigma = \sigma_T = 245$ МПа (предел текучести стали).

На указанные силы должна быть рассчитана конструкция вновь разрабатываемого вагона.

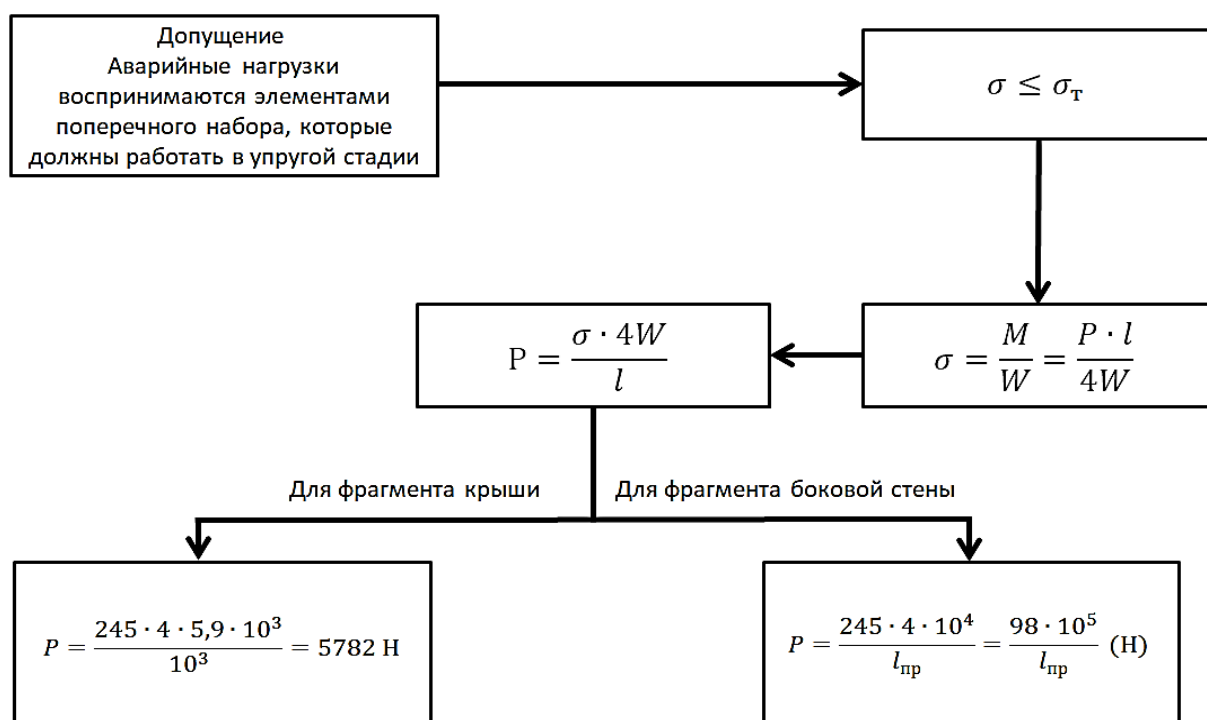


Рисунок 2.10 – Подход для определения соответствия требованиям безопасности вагона с конструкцией кузова, отличной от традиционной

С учётом полученных результатов были сформулированы требования к элементам обшивки крыши и боковых стен кузовов пассажирских вагонов, изготовленных из экструдированных алюминиевых профилей [139]:

1. Для обеспечения достаточной жёсткости крыши панель размером 1000×1000 мм должна рассчитываться на сосредоточенную нагрузку $P = 5782 \text{ Н}$. При этом не должен быть превышен условный предел текучести материала, из которого она изготовлена.

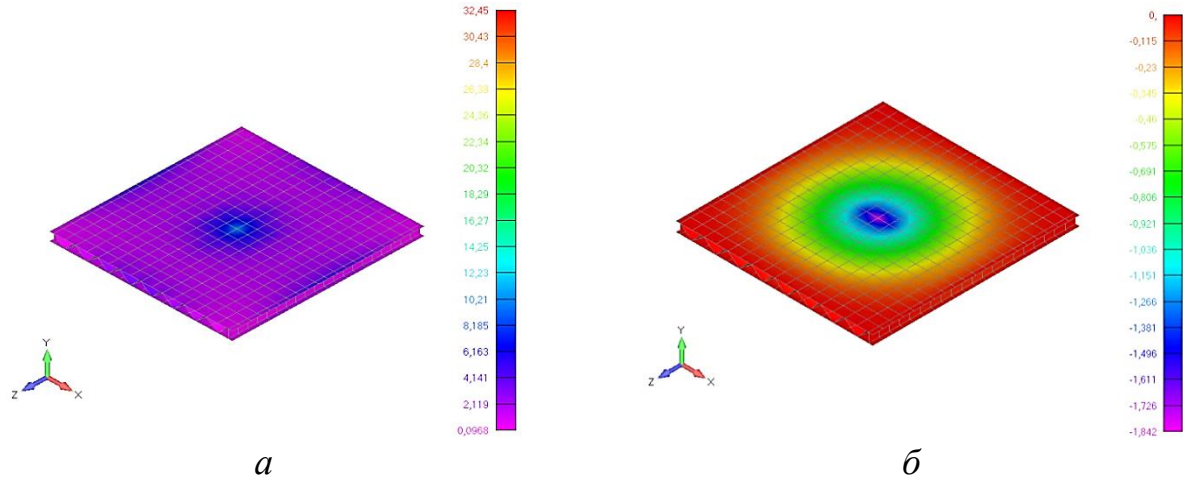
2. Панель боковой стены в зоне оконного проёма должна быть рассчитана на сосредоточенные нагрузки, приложенные посередине простенка на расстоянии 100 мм от кромок оконного проёма и равные $P = \frac{49 \cdot 10^5}{l_{\text{пр}}} \text{ (Н)}$. При этом не должен быть превышен условный предел текучести материала, из которого она изготовлена.

Проверим выполнение указанных требований для объекта исследований.

Проверка первого требования осуществлялась путём нагружения расчётной модели панели в программном комплексе Femap от Siemens PLM Software [140],

реализующим МКЭ. Закрепление расчётной схемы в пространстве обеспечивали заделки, введённые по контуру панели. Размер элементов (тип Plate) – 50×50 мм.

Вертикальная нагрузка прикладывалась в виде узловой сосредоточенной силы в центре пластины. Результаты расчёта приведены на рисунке 2.11.



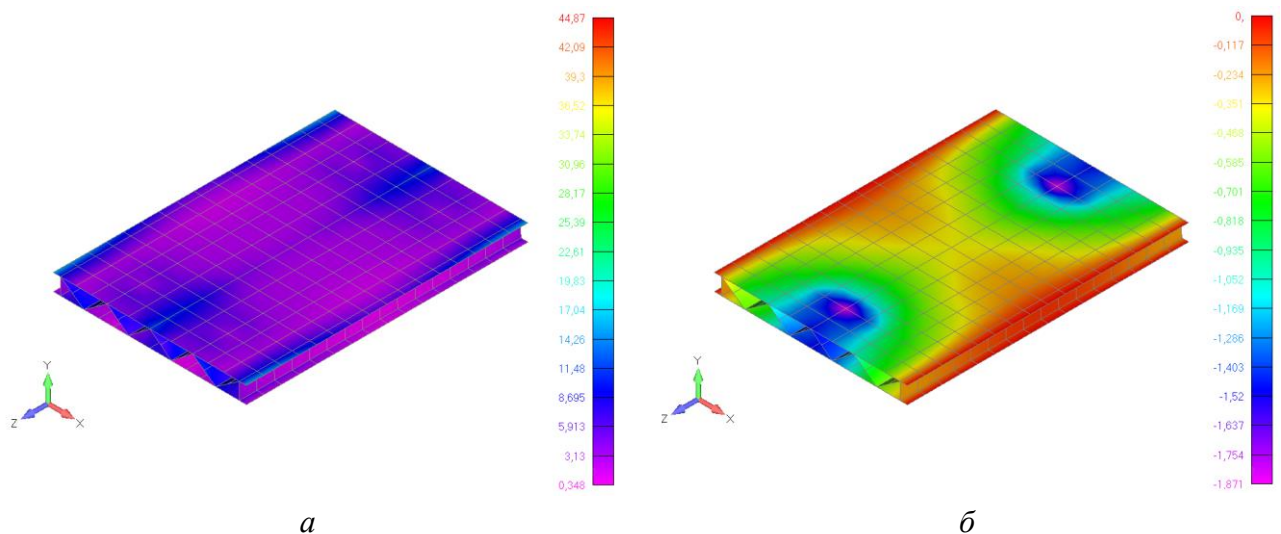
а – напряжения (МПа); б – деформации относительно оси Y (мм)

Рисунок 2.11 – Результаты расчёта объекта исследования по требованию № 1

Проверка второго требования осуществлялась аналогичным образом. Закрепление расчётной схемы проведено по двум кромкам, расположенным вдоль боковой стены вагона. Размер элементов (тип Plate) – 50×50 мм. Длина про-стенка – 780 мм.

Вертикальные нагрузки прикладывались в виде узловых сосредоточенных сил на расстоянии 100 мм от свободных кромок панели.

Результаты расчёта приведены на рисунке 2.12.



а – напряжения (МПа); б – деформации относительно оси Y (мм)

Рисунок 2.12 – Результаты расчёта объекта исследования по требованию № 2

Проверим соответствие объекта исследований п. 5.6 [130].

Для этого определим по формуле (2.1) момент сопротивления W_x , см³, частей панелей, обрамляющих дверной проём и имитирующих главные стойки.

$$W_x = \frac{I_x}{y_{max}}, \quad (2.1)$$

где I_x – геометрический момент относительно центральной оси стойки, параллельной поперечной оси вагона;

y_{max} – расстояние до наиболее удалённой точки сечения.

Геометрические моменты инерции части панели, имитирующей главную стойку концевой части вагона, и расстояние до наиболее удалённой точки сечения определены в САПР AutoCAD (рисунок 2.13).

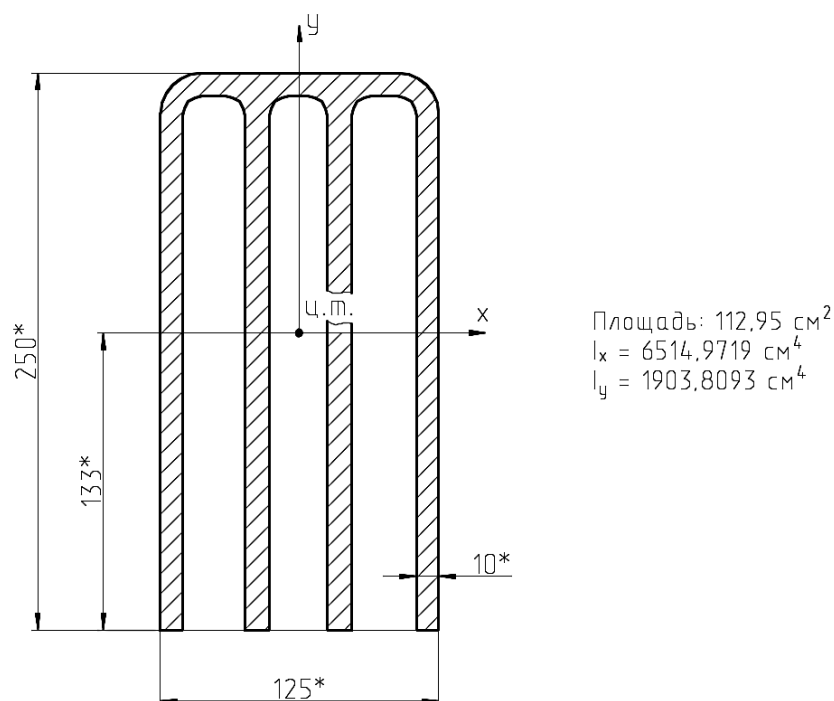


Рисунок 2.13 – Геометрические моменты главных стоек концевой части вагона

Тогда момент сопротивления части панели, имитирующей главную стойку:

$$W_x = \frac{I_x}{y_{max}} = \frac{6515}{13,3} = 490 \text{ см}^3.$$

Ввиду особенности конструкции, в качестве «угловых стоек» торцевой стены выступает всё поперечное сечение, работающее при столкновении вагона с каким-либо препятствием на сжатие.

Геометрические моменты инерции поперечного сечения объекта исследований в торцевой части (до дверного проёма) определены в САПР AutoCAD и приведены для информации (рисунок 2.14).

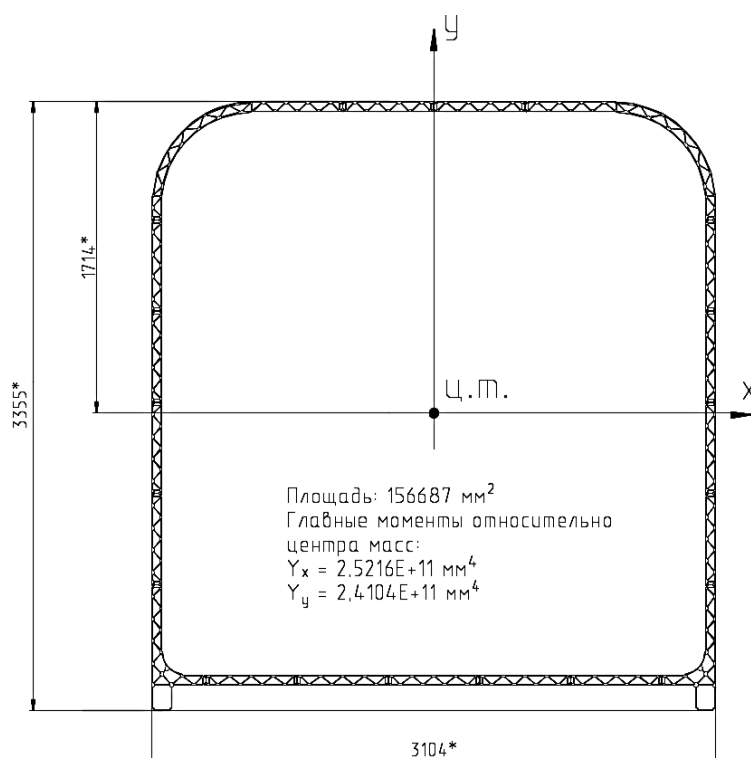


Рисунок 2.14 – Геометрические моменты инерции объекта исследования

Таким образом, кузов объекта исследований соответствует пп. 5.3, 5.4, 5.6 [130].

Проверим соответствие требованиям комфорта для пассажиров и обслуживающего персонала [141], определив по формуле (2.2) низшую собственную частоту изгибных колебаний (f , Гц) (п. 15.11.2 [130]):

$$f = \frac{3,027}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\mu}}, \quad (2.2)$$

где L – длина кузова по концевым стенам;

E – модуль упругости;

I – момент инерции среднего сечения;

μ – погонная масса кузова брутто.

Геометрические моменты инерции среднего сечения по оконному проёму определены в САПР AutoCAD (рисунок 2.15).

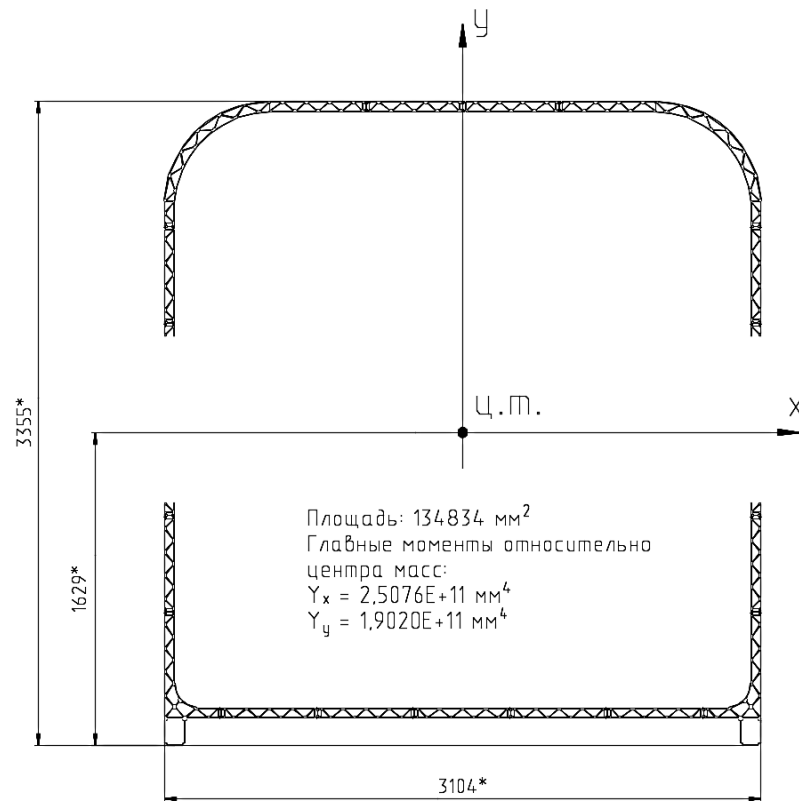


Рисунок 2.15 – Геометрические моменты инерции объекта исследования (среднее сечение, оконный проём)

Тогда, для исследуемого объекта⁷:

$$f = \frac{3,027}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\mu}} = \frac{3,027}{24,42^2} \sqrt{\frac{70 \cdot 10^9 \cdot 0,25}{45600/24,42}} = 15,5 \text{ Гц.}$$

Полученное значение больше 10 Гц, таким образом, объект исследования соответствует требованиям п. 15.11.2 [130] (но всё же построенный вагон должен пройти испытания по подтверждению указанного параметра, например, в соответствии с методикой, аналогичной [142, 143]).

2.3 Разработка конечноэлементной модели кузова исследуемого объекта

Для создания расчётной схемы исследуемого объекта, как и для предварительной проверки соответствия требованиям безопасности, был использован программный комплекс Femap от Siemens PLM Software. Фрагменты расчётной схемы

⁷ Значение массы кузова вагона при проведении расчёта получено как разность массы брутто кузова вагона модели 61-4440 и сэкономленной массы кузова при изготовлении алюминиевого вагона: 48600-(12800-9800) = 45600

приведены на рисунках 2.16–2.17.

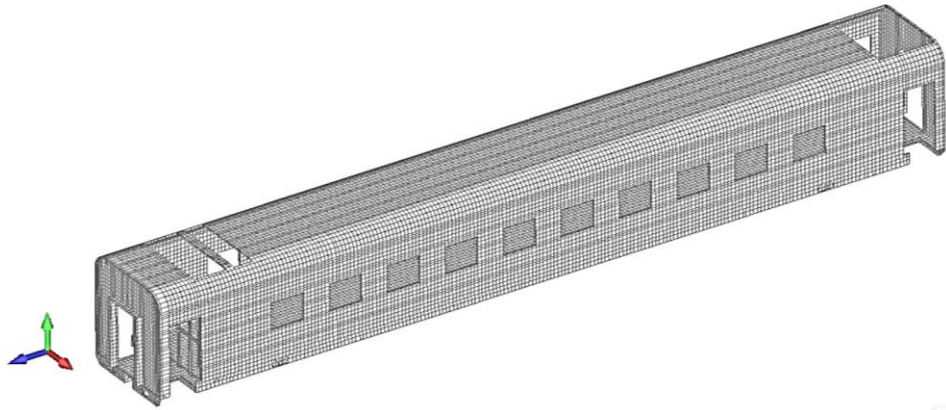


Рисунок 2.16 – Расчётная схема. Общий вид

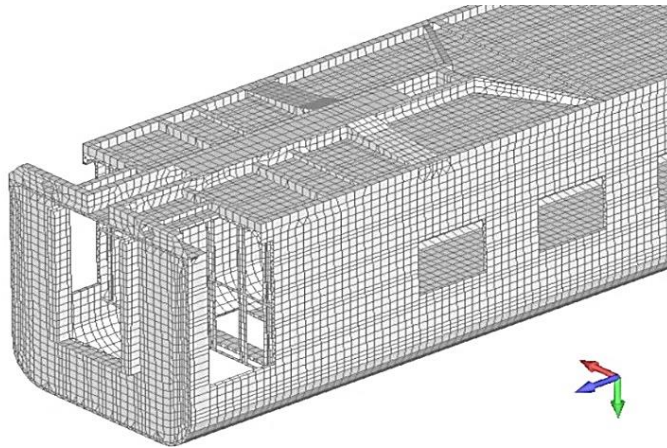


Рисунок 2.17 – Расчётная схема. Консоль рамы

Схема содержит 49445 узлов, 88731 элемент.

Закрепление расчетной схемы в пространстве, как твердого тела (при расчёте по режимам [129]), обеспечивали четыре вертикальные (по оси Z) линейные связи на скользунах, две продольные линейные связи по оси X в месте приложения продольной нагрузки (на одном конце рамы), а также две дополнительные поперечные линейные связи по оси Y по концам кузова.

Вертикальная распределённая нагрузка прикладывалась от собственного веса по всем элементам кузова. Вертикальная нагрузка от оборудования, имеющего значительную массу (области расположения приведены на рисунке 2.18, масса и координаты – в таблице 2.2), прикладывалась в виде узловых сосредоточенных сил к узлам рамы и крыши. Продольные усилия прикладывались к передним (растягивающая нагрузка) или задним (сжимающая нагрузка) упорным угольникам. Расчёт кузова проведён по I и III расчётным режимам. Результаты расчётов представлены на рисунках 2.19–2.24.

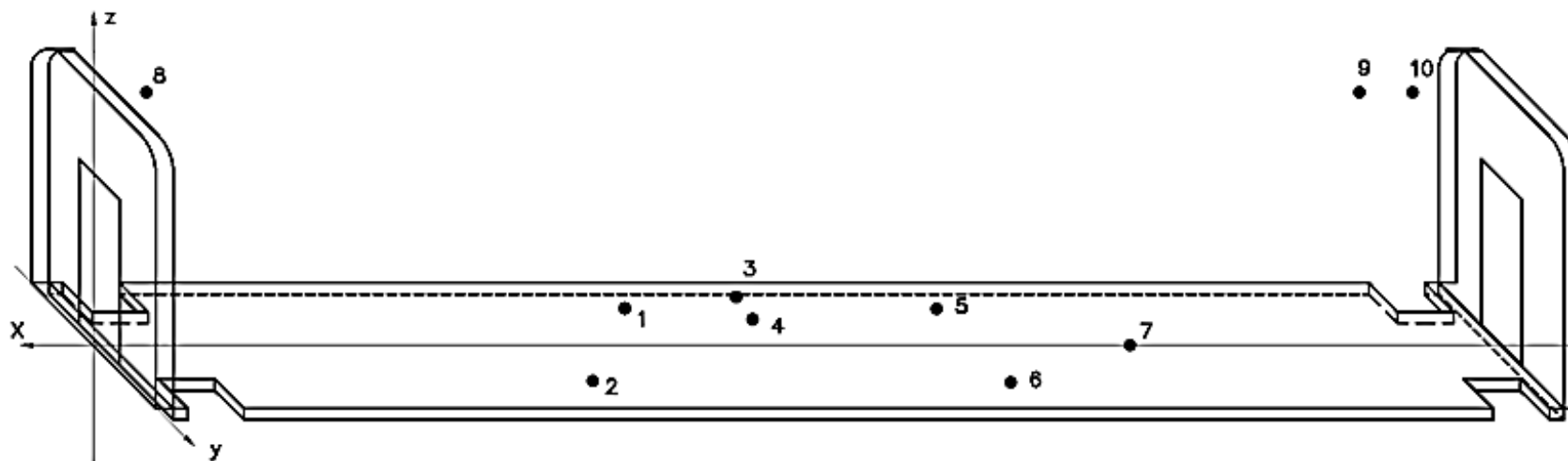


Рисунок 2.18 – Области расположения оборудования, имеющего значительную массу
(панели рамы, торцевые стены показаны условно, боковые стены, крыша не показаны)

Таблица 2.2 – Оборудование, имеющее значительную массу

Номер области	Наименование оборудования	Масса, кг	Координаты центра тяжести, мм			Номер области	Наименование оборудования	Масса, кг	Координаты центра тяжести, мм		
			x	y	z				x	y	z
1	Преобразователь	260	-9975	-910	-495	6	Аккумуляторный бокс	1200	-15455	910	-406
2	Высоковольтный ящик	140	-8729	850	-450	7	Фекальный бак	630	-18165	0	-700
3	Низковольтный ящик	220	-11875	-1200	-495	8	Кондиционер	1200	-840	0	2665
4	Низковольтный ящик	140	-11775	-650	-495	9	Водяной бак	650	-22950	0	2764
5	Аккумуляторный бокс	1200	-15455	-910	-406	10	Водяной бак	400	-22020	0	2764

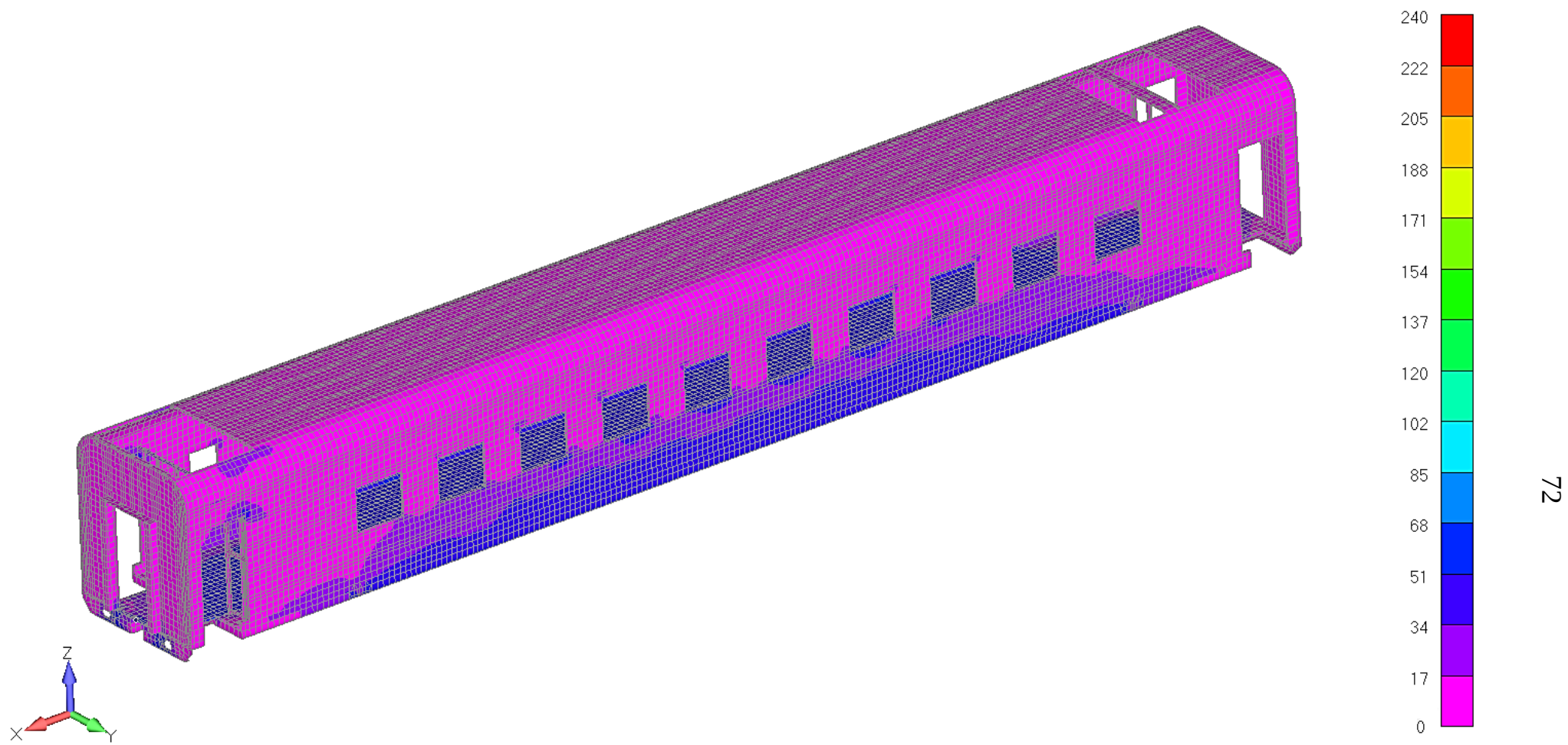


Рисунок 2.19 – Эквивалентные напряжения при I расчётном режиме, МПа

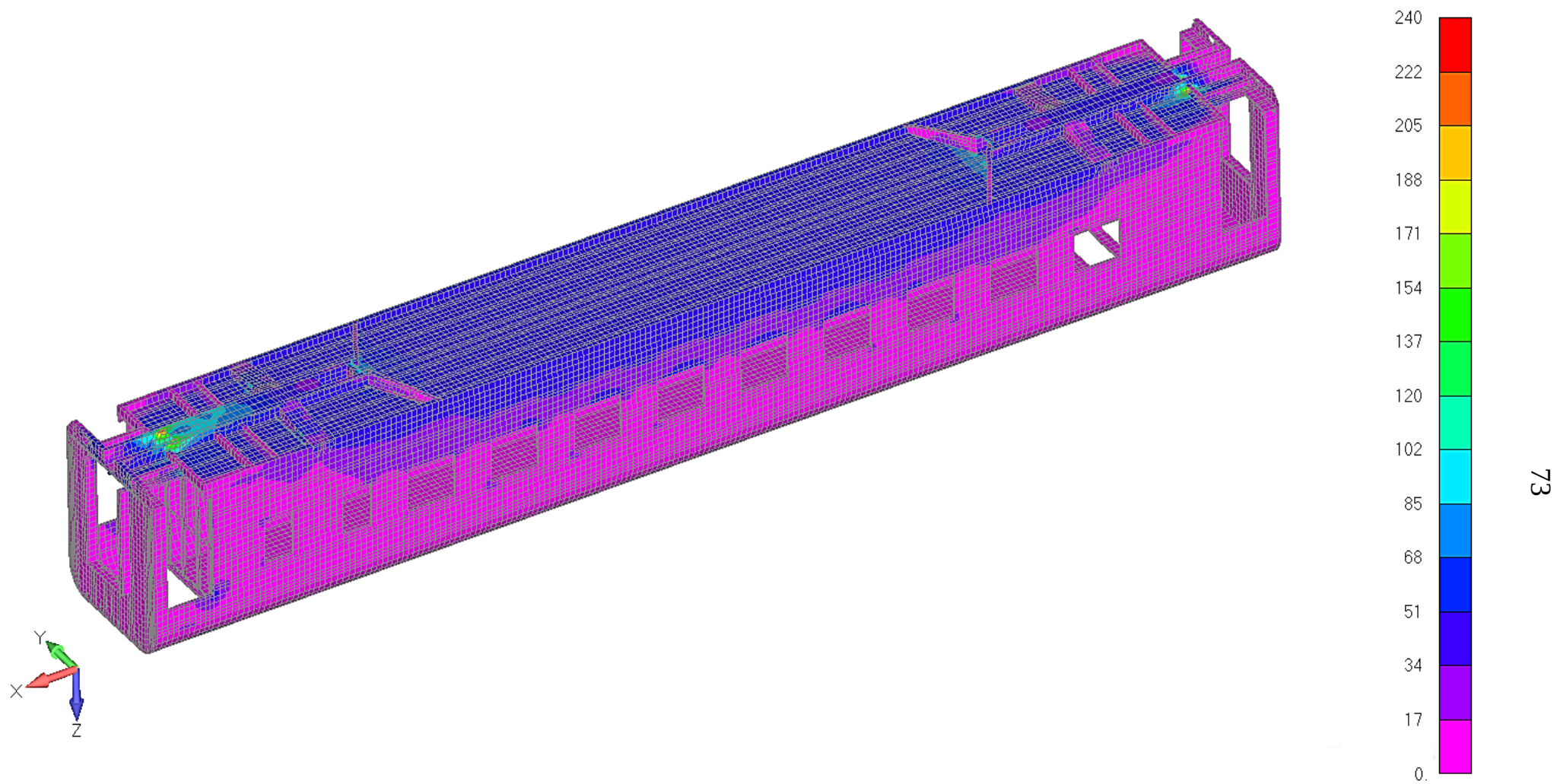


Рисунок 2.20 – Эквивалентные напряжения при I расчётном режиме (вид на раму), МПа

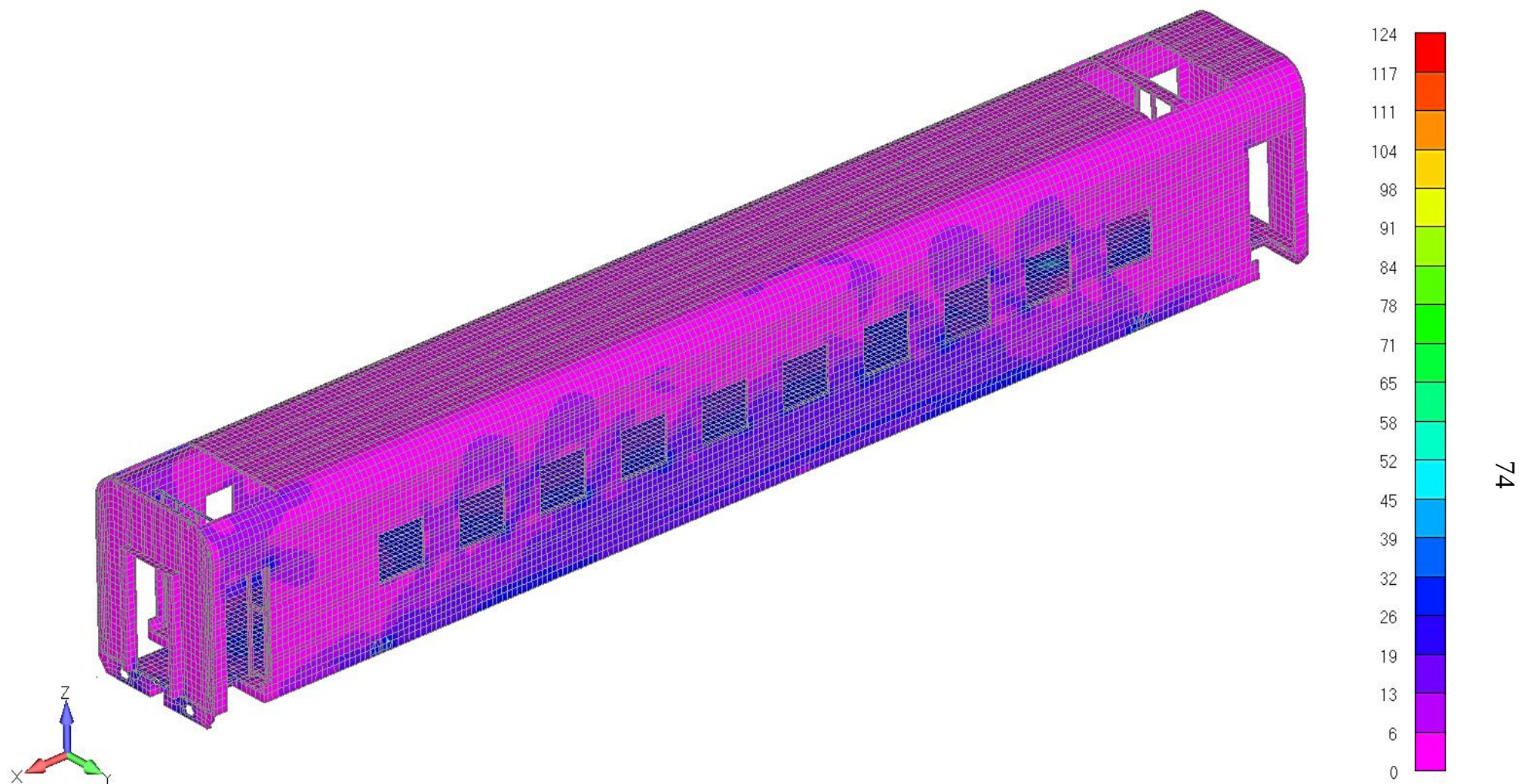


Рисунок 2.21 – Эквивалентные напряжения при III расчётном режиме (сжатие), МПа

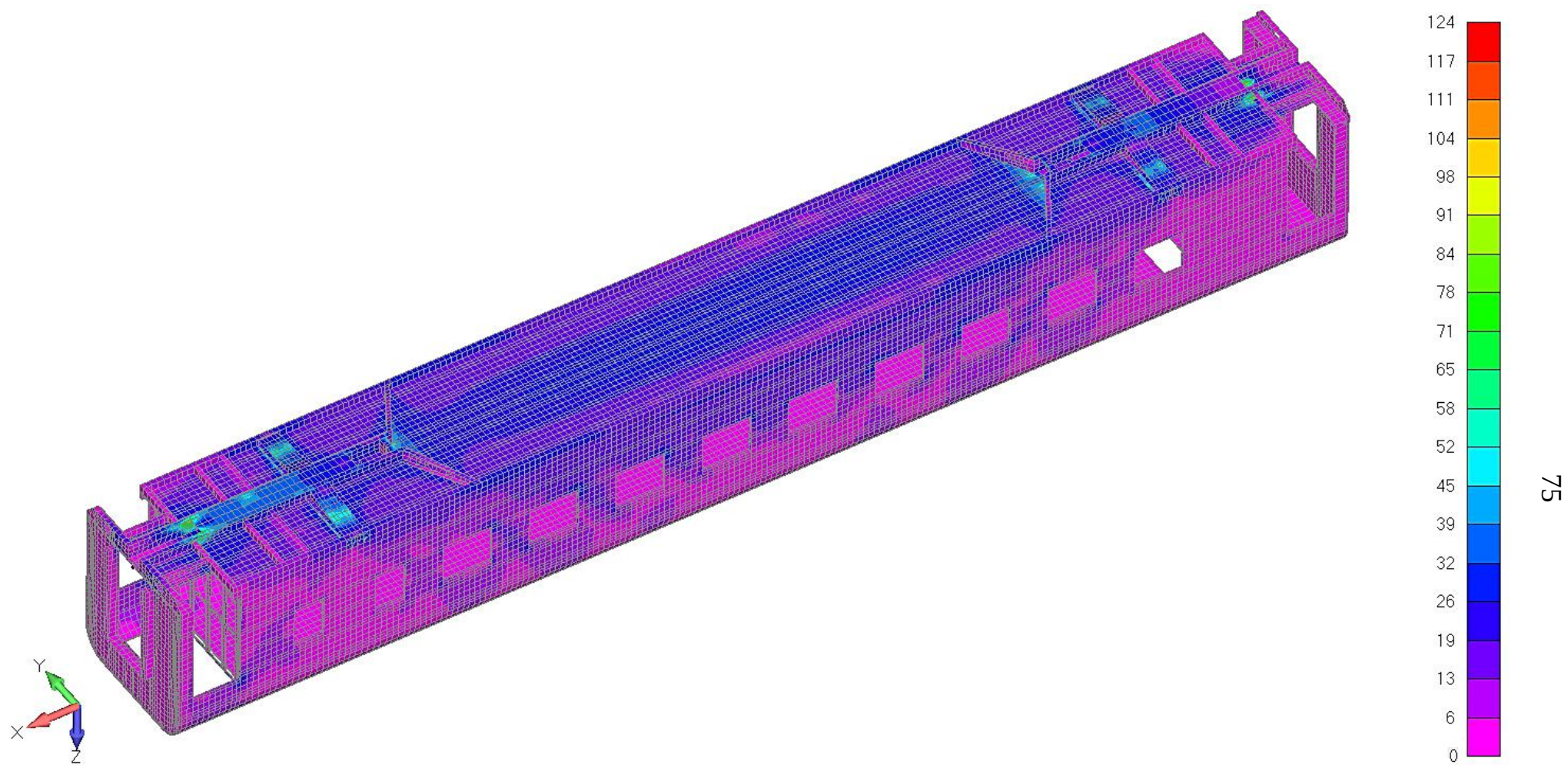


Рисунок 2.22 – Эквивалентные напряжения при III расчётном режиме (сжатие), вид на раму, МПа

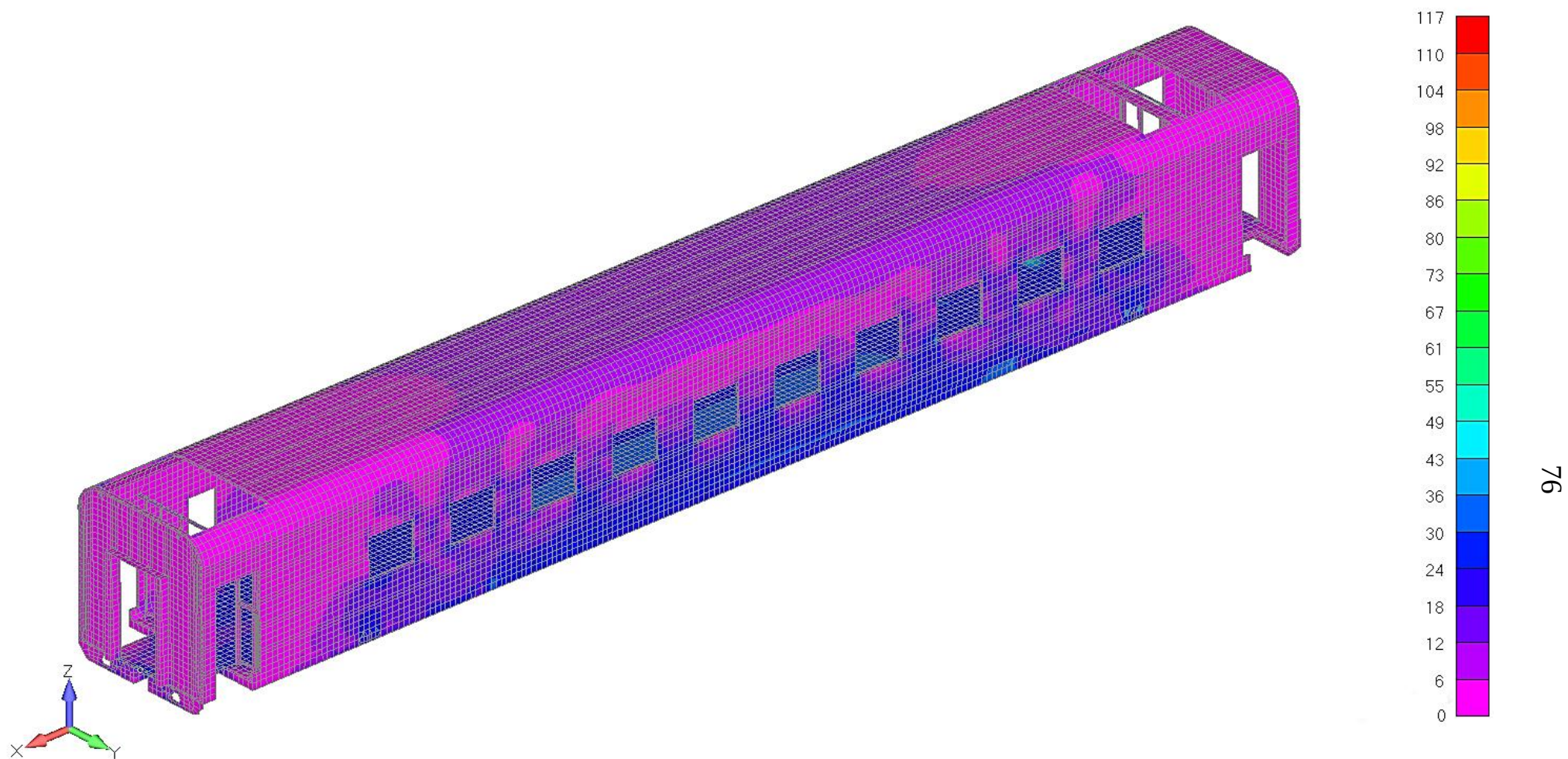


Рисунок 2.23 – Эквивалентные напряжения при III расчётном режиме (растяжение), МПа

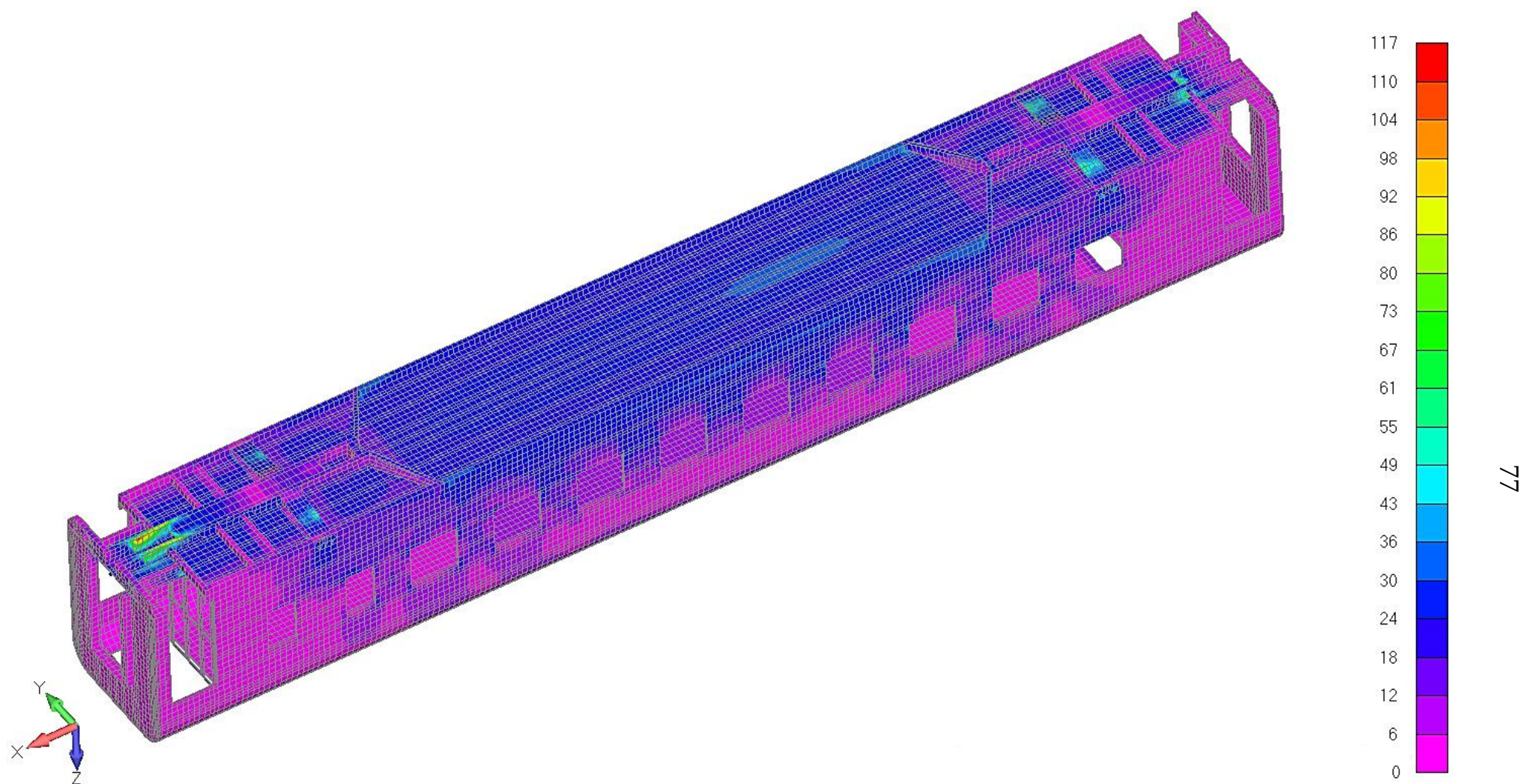
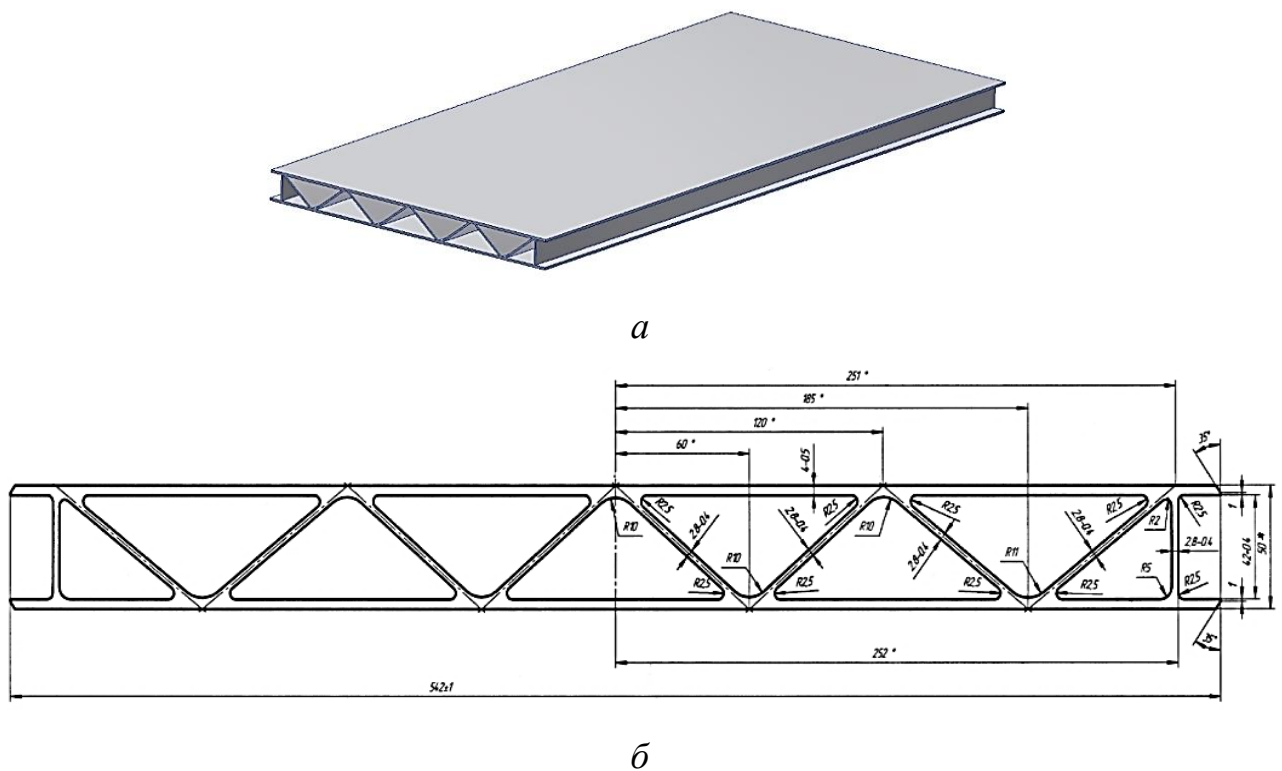


Рисунок 2.24 – Эквивалентные напряжения при III расчётном режиме (растяжение), вид на раму, МПа

2.4 Экспериментальное исследование напряжённо-деформированного состояния экструдированной панели

Для верификации расчётной модели кузова пассажирского вагона из алюминиевых сплавов, а также с целью определения размеров конечных элементов, обеспечивающих необходимую точность вычислений при минимальной затрате времени на расчёт, проведено экспериментальное исследование экструдированной панели, предлагаемой для формирования поперечного сечения вагона.

Объектом испытаний являлась экструдированная алюминиевая панель производства ОАО «КУМЗ», изготовленная в соответствии с чертежом Е01.1191 (шифр профиля по каталогу предприятия – НП4378) из сплава АД31 (состояние сплава – Т5) (рисунок 2.25) (её геометрические параметры стенки и рёбер (толщина, шаг) были подобраны при освоении серийного производства в рамках проведения работ по изготовлению отечественных полувагонов из алюминиевых сплавов, проводимых ИЦ ВАСО при консультациях специалистов АО «ВНИИЖТ» [144]).



а – общий вид; б – поперечное сечение
Рисунок 2.25 – Объект испытаний

Испытания проведены в помещении участка стендовых испытаний ЗАО НО «ТИВ» при условиях окружающей среды, не оказывающих неблагоприятного воздействия на требуемое качество измерений и не приводящих к получению недостоверных результатов.

Контролируемыми показателями при проведении испытаний являлись:

- геометрические размеры;
- напряжения, возникающие при нагружении панели;
- деформации, возникающие при нагружении панели.

Используемые при проведении эксперимента поверенные в установленном порядке средства измерений приведены в таблице 2.3.

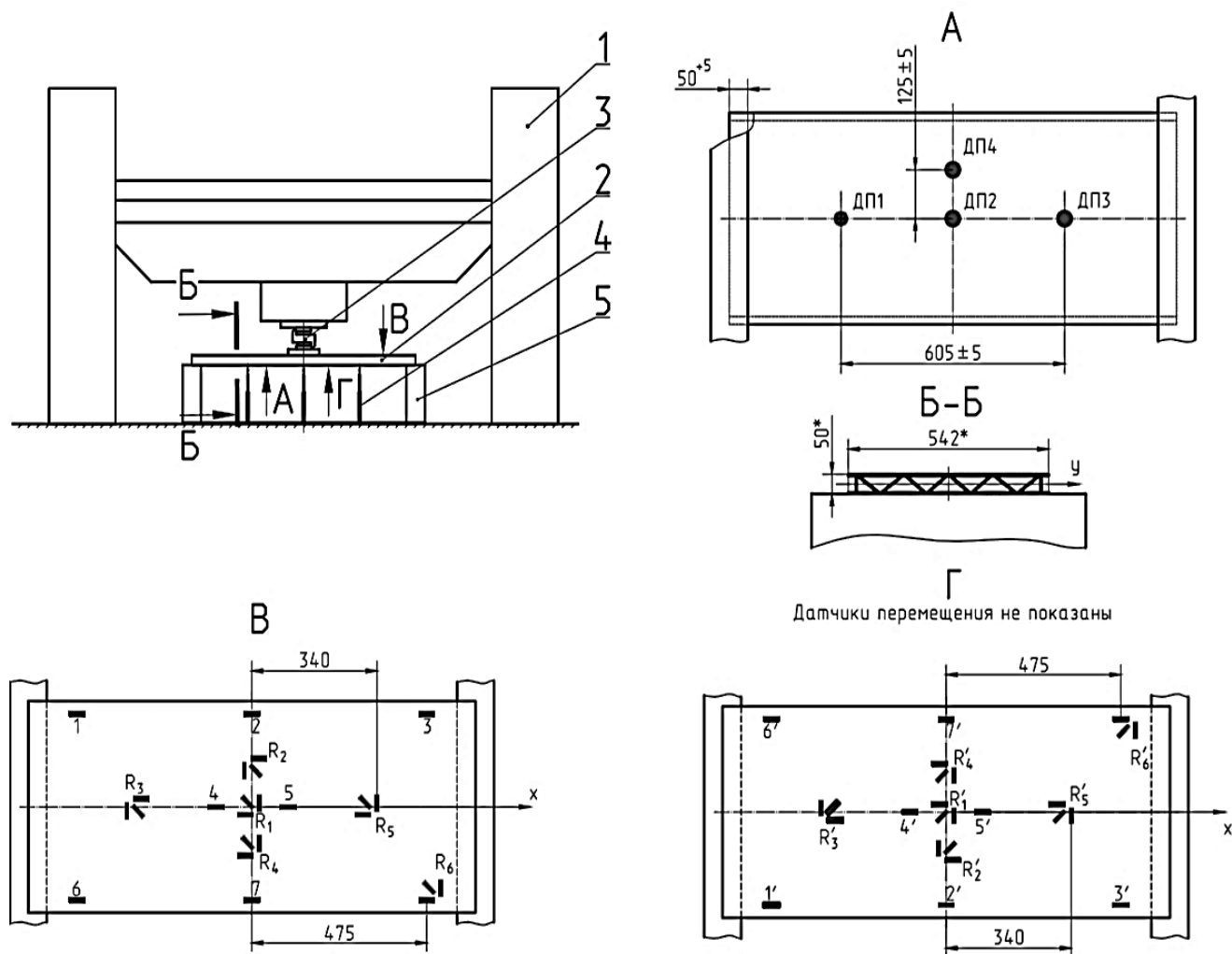
Таблица 2.3 – Средства измерений, используемые при проведении работ

Наименование контролируемого показателя	Наименование средства измерения
Геометрические размеры	Рулетка
	Штангенциркуль
Нагрузка	Датчик силоизмерительный тензорезисторный
Микродеформации (напряжения)	Усилитель измерительный Spider-8
Деформации	Датчик перемещения индуктивный
Сведения об условиях окружающей среды при проведении испытаний	Термогигрометр ИВА-6Н-Д

При проведении испытаний была реализована схема установки, приведенная на рисунке 2.26.

На рисунке 2.26 также приведены:

- схема установки датчиков перемещения (ДП1, ДП2, ДП3, ДП4) (вид А);
- схема расположения панели в стенде (вид Б);
- схема установки тензорезисторных датчиков (вид В, вид Г) (здесь № 1–7, № 1'–7' – одиночные датчики, R_1 – R_6 , R'_1 – R'_6 – трёхэлементные прямоугольные розетки датчиков).



1 – стенд для испытаний крупногабаритных изделий; 2 – панель; 3 – датчик силоизмерительный тензорезисторный; 4 – датчик перемещения индуктивный; 5 – опора

Рисунок 2.26 – Общий вид установки для проведения испытаний и схема расположения датчиков

При подготовке и проведении испытаний была реализована следующая последовательность действий.

На исследуемый образец в предварительно подготовленных местах (зачищенных и отполированных) в соответствии с принятой схемой размещения датчиков на клей были установлены тензорезисторные датчики (рисунок 2.27). Датчики перемещений были смонтированы через захваты посредством струбцин к металлическому брусу, не имеющему связи с испытуемым образцом и опорами (рисунок 2.28).

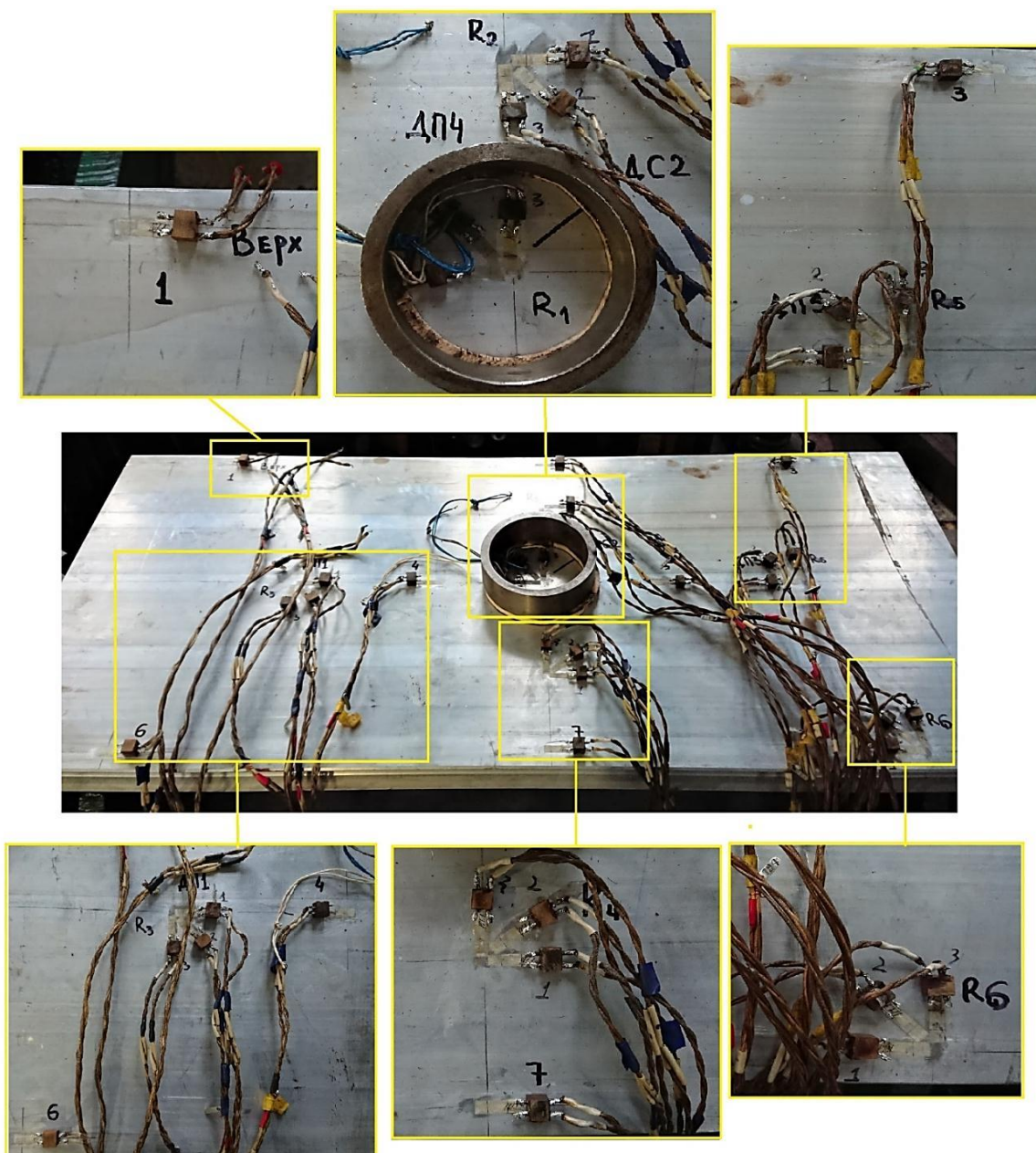


Рисунок 2.27 – Монтаж тензорезисторных датчиков

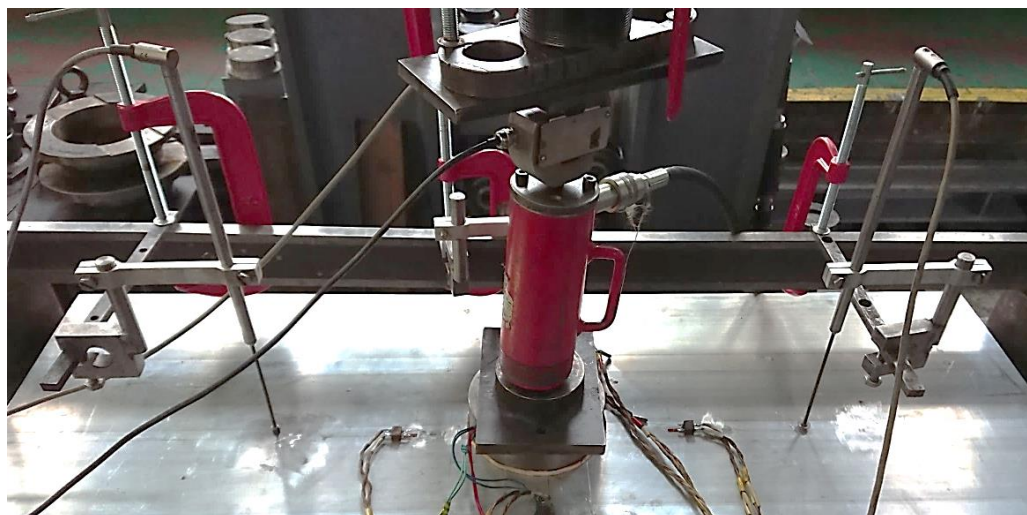


Рисунок 2.28 – Монтаж датчиков перемещения

Испытуемый образец ступенчато (200 кг, 400 кг, 600 кг, 800 кг, 1000 кг) нагружался в его геометрическом центре через стальной цилиндр (наружный диаметр – 150 мм, толщина стенки – 12 мм).

Общий алгоритм проведения испытаний приведен на рисунке 2.29.

При проведении эксперимента была проведена запись процесса нагружения во времени (зафиксированы перемещения и напряжения).

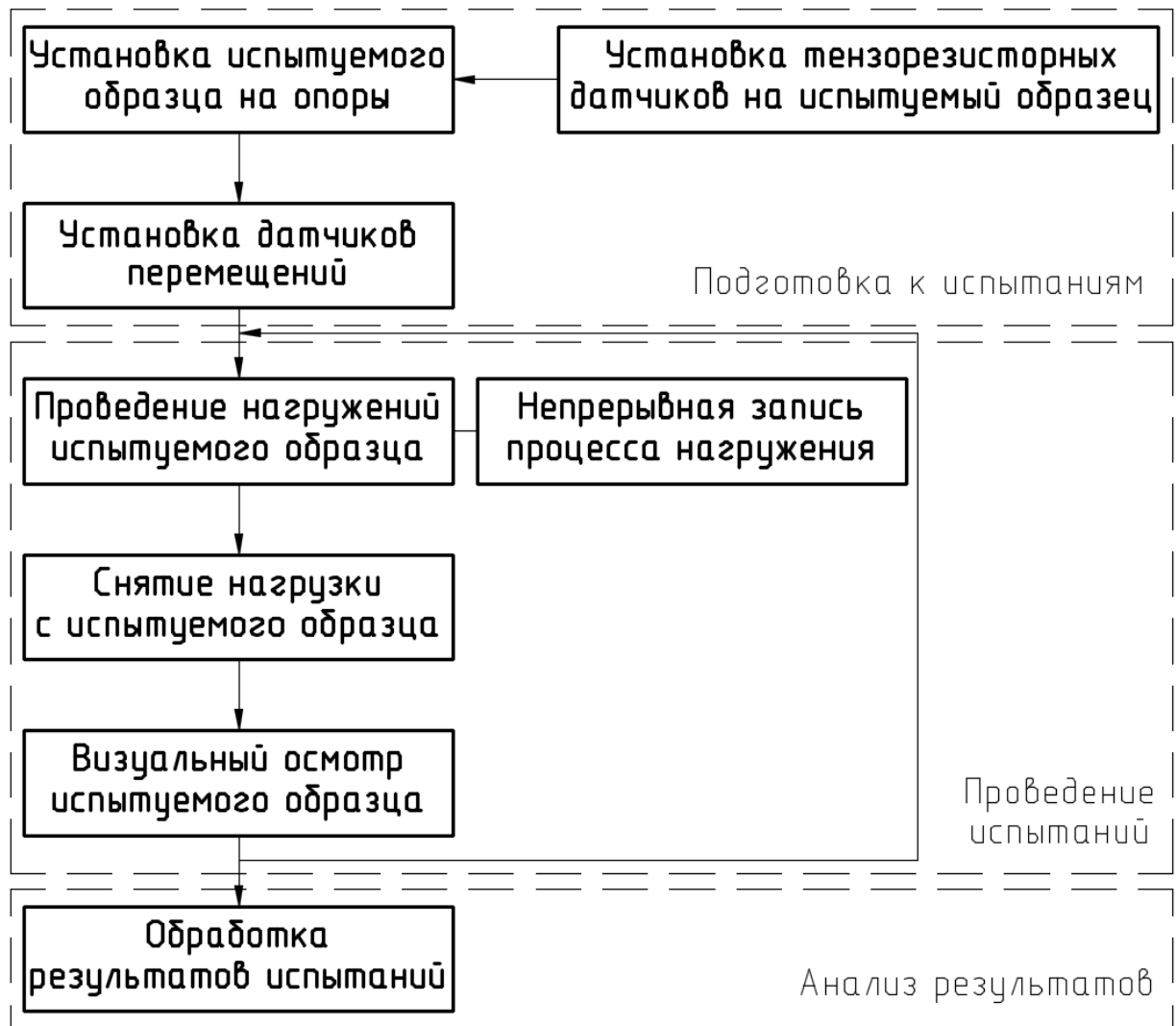


Рисунок 2.29 – Общий алгоритм проведения испытаний

Результаты нагружения панели приведены в таблице 2.4. В указанной таблице не приведены значения, зарегистрированные в датчиках № 1, № 1', № 3, № 3', № 6, № 6' и розетках R_6 , R'_6 , находящихся в наиболее удалённых от места приложения нагрузки зонах, ввиду незначительности их значений, а также, по той же причине, по датчикам 2 для розеток R_2 , R'_2 , R_4 , R'_4 (датчики, находящиеся под углом 45°).

Таблица 2.4 – Результаты нагружения панели, напряжения, МПа

Обозначение розетки		R'_1			R'_2		R'_4		—*	—	R_1			R_2		R_4		—	—
Номер датчика		1	2	3	1	3	1	3	4'	5'	1	2	3	1	3	1	3	4	5
№ 1	200 кг	5	3	1	4	-1	4	-1	4	4	-5	-3	-1	-4	1	-4	1	-4	-4
	400 кг	9	6	2	9	-2	9	-2	8	8	-9	-4	-2	-9	2	-9	3	-8	-8
	600 кг	14	9	3	13	-2	14	-3	11	12	-14	-5	-3	-13	3	-13	4	-11	-11
	800 кг	18	11	4	18	-3	18	-3	15	16	-18	-7	-4	-18	3	-17	6	-15	-15
	1000 кг	23	14	5	22	-4	23	-4	19	19	-23	-8	-5	-22	4	-22	7	-19	-19
№ 2	200 кг	5	3	1	5	-1	5	-1	4	4	-5	-3	-1	-4	1	-4	1	-4	-4
	400 кг	9	6	2	9	-1	9	-2	7	8	-9	-4	-2	-9	1	-9	3	-7	-8
	600 кг	14	9	3	14	-2	14	-2	11	12	-14	-5	-3	-13	2	-13	4	-11	-11
	800 кг	18	11	5	18	-2	19	-3	15	16	-18	-7	-5	-18	2	-17	6	-15	-15
	1000 кг	23	14	5	22	-3	23	-4	18	19	-23	-7	-5	-22	3	-21	7	-18	-19
№ 3	200 кг	5	3	1	4	-1	5	-1	4	4	-5	-2	-1	-5	1	-4	1	-4	-4
	400 кг	10	6	2	9	-2	10	-2	8	8	-10	-4	-2	-10	2	-9	3	-8	-8
	600 кг	14	9	3	13	-3	14	-2	11	12	-14	-5	-3	-13	3	-13	4	-11	-11
	800 кг	18	11	4	18	-3	18	-3	15	15	-18	-7	-4	-18	4	-17	6	-15	-15
	1000 кг	22	14	5	22	-4	23	-4	19	19	-22	-8	-5	-22	4	-21	7	-19	-18
Среднее	200 кг	5	3	1	4	-1	5	-1	4	4	-5	-3	-1	-4	1	-4	1	-4	-4
	400 кг	9	6	2	9	-2	9	-2	8	8	-9	-4	-2	-9	2	-9	3	-8	-8
	600 кг	14	9	3	13	-2	14	-2	11	12	-14	-5	-3	-13	3	-13	4	-11	-11
	800 кг	18	11	4	18	-3	18	-3	15	16	-18	-7	-4	-18	3	-17	6	-15	-15
	1000 кг	23	13	5	22	-4	23	-4	18	19	-23	-7	-5	-22	4	-21	7	-18	-19

* Знаком «—» обозначены одиночные датчики

Обработка результатов испытаний для розеток датчиков R_1 , R'_1 проведена в соответствии с рекомендациями [145].

Для определения размеров конечных элементов, обеспечивающих удовлетворительную сходимость результатов вычислений с результатами эксперимента, в программном комплексе Femap был проведён расчёт объекта испытаний. При этом были реализованы пластинчатые схемы с размерами конечных элементов 10×10 мм, 25×25 мм, 50×50 мм, 80×80 мм.

В качестве примера на рисунке 2.30 (слева) приведена расчётная схема панели с элементами 10×10 мм. Её закрепление в пространстве обеспечивали вертикальные (по оси Y, на рисунке не показаны) линейные связи в месте опирания панели на опоры стенда, а также заделки, находящиеся в углах панели. Справа на рисунке 2.30 показана деформация объекта испытаний.

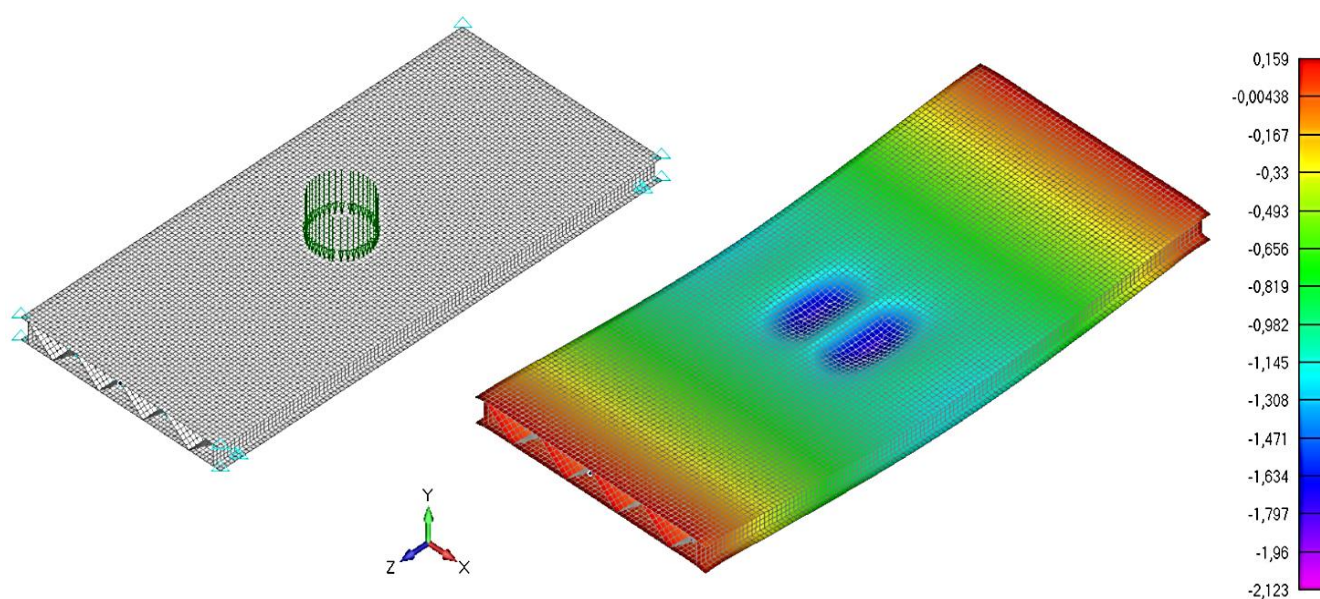


Рисунок 2.30 – Определение деформации объекта испытаний в вертикальной плоскости

Сопоставление экспериментальных и расчётных (в зависимости от размеров конечных элементов) данных (расхождение определено для большего по модулю напряжения) для нагрузки 1000 кг по главным нормальным напряжениям и деформациям приведено в таблицах 2.5–2.6.

Таблица 2.5 – Сопоставление экспериментальных и расчётных данных, нормальные напряжения, МПа

Вариант получения данных	Номер датчика или розетки									
	R'_1	R'_2	R'_4	4'	5'	R_1	R_2	R_4	4	5
Эксперимент	27; 14	22; -4	23; -4	18	19	-28; -13	-22; 4	-21; 7	-18	-19
Расчёт, 10×10 мм	28; 16	20; -4	24; -3	20	20	-31; -16	-21; 5	-18; 6	-22	-17
Расхождение*, %	4	9	4	10	5	10	5	14	18	11
Расчёт, 25×25 мм	29; 15	20; -5	22; -5	21	21	-31; -18	-23; 4	-18; 6	-22	-20
Расхождение, %	7	9	4	17	10	10	4	14	18	5
Расчёт, 50×50 мм	30; 17	25; -7	24; -6	20	23	-32; -18	-25; 5	-20; 8	-23	-21
Расхождение, %	10	12	4	10	17	13	12	5	22	10
Расчёт, 80×80 мм	32; 17	23; -6	26; -7	22	24	-35; -17	-26; 7	-23; 11	-23	-23
Расхождение, %	16	4	12	18	21	20	15	9	22	17
*Расхождение определено для большего по модулю напряжения. Значение округлено до ближайшего целого числа										

Таблица 2.6 – Сопоставление экспериментальных и расчётных данных, деформации, мм

Вариант получения данных	Количество элементов в расчётной схеме	Перемещение, мм			
		ДП1	ДП2	ДП3	ДП4
Эксперимент	–	1,33	1,97	1,27	1,83
Расчёт, 10×10 мм	21297	1,48	2,09	1,47	2,04
Расчёт, 25×25 мм	3504	1,59	2,25	1,56	2,12
Расчёт, 50×50 мм	960	1,62	2,28	1,62	2,19
Расчёт, 80×80 мм	450	1,72	2,36	1,73	2,25

Выводы по разделу 2

1 Ввиду отсутствия в РФ серийных отечественных вагонов из алюминиевых сплавов в качестве объекта исследования принята вновь разработанная конструкция кузова с поперечным сечением и торцевыми стенами, сформированными из экструдированных алюминиевых панелей, соответствующих габаритными размерами панели производства ОАО «КУМЗ».

2 Приведено описание кузова указанной конструкции.

3 Определена необходимость дополнения существующей нормативной базы для проведения проектных работ.

4 Приведён подход, позволяющий на этапе проектирования проверить соответствие кузова пассажирского вагона с конструкцией, отличной от традиционной, требованиям безопасности, указанным в нормативной документации.

5 Сформулированы требования к элементам обшивки крыши и боковых стен кузова вагона с поперечным сечением, сформированным из экструдированных алюминиевых панелей.

Проведена предварительная оценка соответствия вновь разработанного кузова требованиям нормативной документации в части пп. 5.3, 5.4, 5.6, 15.11.2 [130].

6 Разработана конечноэлементная модель объекта исследования.

7 Проведены расчёты по I и III режимам [129], подтвердившие соответствие разработанного кузова требованиям прочности.

Кроме того, ввиду невысокого уровня напряжений, зафиксированных в экструдированных панелях боковых стен и крыши (не более 85 МПа в подоконных поясах боковых стен при I расчётном режиме), а также с учётом «запаса» по низшей собственной частоте изгибных колебаний, определена возможность проведения работ по уменьшению толщин указанных узлов кузова, а, следовательно, дополнительному снижению массы, что является отдельным вопросом исследования.

8 В качестве объекта испытаний для проверки выполненной модели и определения размеров конечных элементов, обеспечивающих необходимую точность вычислений при минимальной затрате времени на расчёт, проведено экспериментальное исследование экструдированной панели, предлагаемой для формирования поперечного сечения вновь разрабатываемого кузова вагона.

9 Проведено экспериментальное исследование напряжённо-деформированного состояния указанной панели [146].

10 Проведены расчёты для объекта испытаний. При этом были реализованы пластинчатые схемы с размерами конечных элементов 10×10 мм, 25×25 мм, 50×50 мм, 80×80 мм.

Проведённые расчёты позволили сделать следующий вывод.

Уменьшение размеров конечных элементов с 80×80 мм до 10×10 мм позволило увеличить точность расчёта на 6 % (расхождение экспериментальных и расчётных данных для пластинчатой схемы из конечных элементов с размерами 10×10 мм составило 9 %⁸, для схемы из конечных элементов с размерами 80×80 мм – 15 %), однако, количество элементов при этом увеличилось в 47 раз.

Ввиду наличия экструдированных профилей более сложной конфигурации, а также с учётом перспективности применения в конструкциях композиционных материалов или иных профилей (сэндвич-панели, сотовые профили и т. д.) (рисунок 2.31⁹), становится актуальным вопрос реализации в массовых расчётах подхода, состоящего в замене таких панелей более простыми элементами, например, ортотропными пластинами, с целью упрощения расчётных схем кузовов и сокращения времени на проведение проектных работ.

Далее приведём методику расчёта (учёта) экструдированных панелей при анализе напряжённо-деформированного состояния кузовов пассажирских вагонов.

⁸ Значение получено как среднеарифметическое по результатам расхождения экспериментальных и аналитических данных для рассматриваемых точек (таблица 2.5)

⁹ На рисунке 2.31 приведены варианты структур панелей, описанных в статье [147]

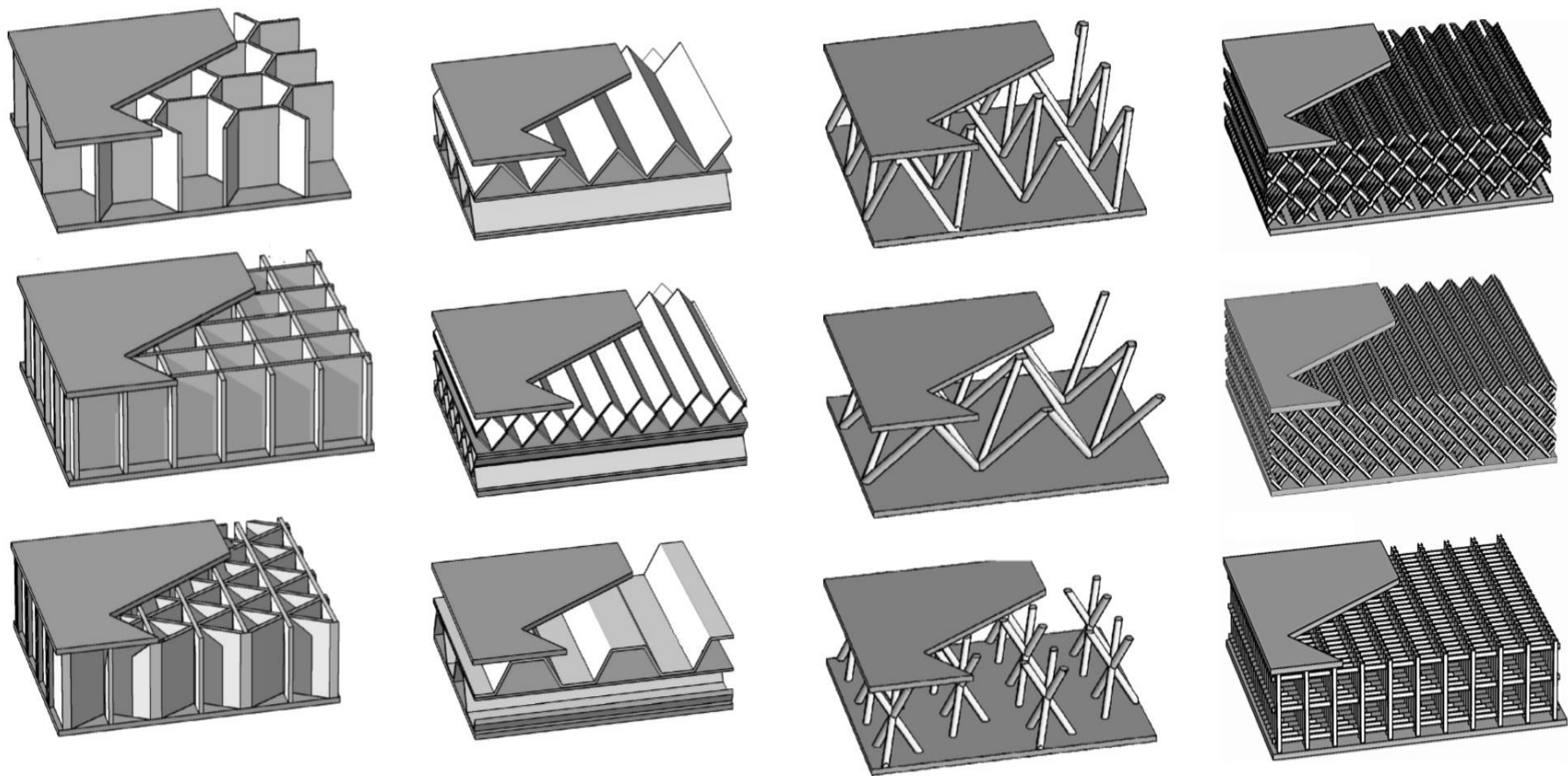


Рисунок 2.31 – Некоторые возможные варианты структуры панелей

3 МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПАНЕЛЕЙ

3.1 Упрощение расчётной схемы

Конструкции, рассмотренные выше (в том числе экструдированные панели, предлагаемые для формирования кузова вновь разработанного вагона), вследствие сложности их геометрической структуры, вряд ли могут быть использованы как фрагмент общей структуры объекта (кузова вагона) при проведении массовых расчётов, например, на этапе оптимизации, поэтому оказывается целесообразной реализация подхода, состоящего в замене экструдированных (сотовых) элементов более простыми, для которых в стандартных МКЭ-комплексах существуют апробированные (и стандартные) конечные элементы. Мелкоячеистая структура сотовых панелей позволяет предположить, что достаточно эффективной и, в то же время достаточно простой, будет замена таких панелей ортотропными панелями, упругие свойства которых в общем случае описываются не более чем шестью упругими постоянными. Таким образом, замена сотовой панели эквивалентной ортотропной панелью сводится к разысканию упругих постоянных этой эквивалентной модели. Достаточно распространённым приёмом при поиске этих постоянных является приём выделения из панели обычно одномерного (иногда – двумерного) фрагмента, нагружение его простыми краевыми нагрузками, определение краевых перемещений и их приравнивание одноимённым перемещениям, найденным для эквивалентного фрагмента. В ещё более упрощённой постановке в докомпьютерную эпоху всё дело сводилось к редуцированию тех или иных геометрических характеристик фрагмента (толщины, площади, момента инерции и т. д.). Кроме того, могли вводиться дополнительные гипотезы о связях упругих постоянных эквивалентной модели. Например, в нашем случае можно предположить о примерном равенстве нормальных модулей упругости в плоскости панели, а также двух модулей сдвига.

Более обоснованным является подход, основанный не на отождествлении частных характеристик исходной конструкции и её эквивалентной модели-перемещений в выделенных точках от некоторых характерных нагрузок, а отождествление таких интегральных характеристик как потенциальные энергии конструкции и её модели. При этом поиск эквивалентных упругих характеристик можно осуществлять как на основе теоретического сравнения исходной конструкции и её ортотропной модели, так и на отождествлении экспериментальных данных, полученных для исходной конструкции и её теоретической ортотропной модели. Если речь идёт об упругой области, то для исходной конструкции, при её нагружении крайевыми усилиями, целесообразно вместо потенциальной энергии использовать равную ей работу внешних краевых усилий. Учитывая, что в упругой области обобщённое усилие P связано с соответствующим обобщённым перемещением u соотношением:

$$P(u) = ku, \quad (3.1)$$

найдем, что соответствующая работа A_p будет равна:

$$A_p = \int_u P(u) du = \frac{1}{2} Pu, \quad (3.2)$$

где в правой части (3.2) через P и u обозначены конечные значения соответствующих величин. В дальнейшем при определении эквивалентных характеристик будем рассматривать схему нагружения, изображённую на рисунке 3.1.

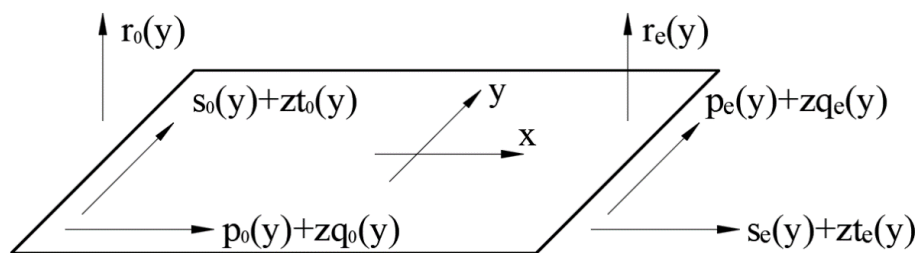


Рисунок 3.1 – Схема нагружения панели краевыми нагрузками

Для такой схемы целесообразно считать, что продольные кромки закреплены от перемещений и поворотов, а поперечные – свободны. Постоянные по толщине распределённые погонные нагрузки p, r, s могут являться функциями координаты y , нагрузки $q(y)$ могут быть смоделированы кромочными

распределёнными изгибающими моментами $m_y(y)$, а $t(y)$ – кромочными распределёнными крутящими моментами $m_x(y)$:

$$q(y) = \frac{12}{h^3} m_y(y), t(y) = \frac{12}{h^3} m_x(y), \quad (3.3)$$

где h – толщина панели.

При решении задачи используем обычную в теории пластин и оболочек аппроксимацию поля перемещений:

$$u^x = u + z\varphi, \quad u^y = v + z\theta, \quad u^z = w, \quad (3.4)$$

где u, v, w, φ, θ – функции координат x, y срединной плоскости.

Подстановка (3.4) в выражение (3.2) после интегрирования по z -координате в пределах $\left[-\frac{h}{2}; \frac{h}{2}\right]$ даёт следующее выражение для работы A :

$$A = \frac{1}{2} \int_y \left\{ [p_0(u_0)u_0 + p_e(u_e)u_e + s_0(v_0)v_0 + s_e(v_e)v_e + r_0(w_0)w_0 + r_e(w_e)w_e]h + \frac{h^3}{12} [q_0(\varphi_0)\varphi_0 + q_e(\varphi_e)\varphi_e + t_0(\theta_0)\theta_0 + t_e(\theta_e)\theta_e] \right\} dy \quad (3.5)$$

В общем случае вычисления по (3.5) придётся производить численно, а при использовании сосредоточенных нагрузок (и соответствующей интерпретации p, s и т. д.) они сводятся к алгебраической сумме.

Перейдём теперь к решению задачи для силового нагружения ортотропной эквивалентной модели, изображённой на рисунке 3.1. Закон Гука для неё сводится к следующим выражениям [148]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E_x} - \nu_{yx} \frac{\sigma_y}{E_y} - \nu_{zx} \frac{\sigma_z}{E_z}, \quad \varepsilon_y = -\nu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} - \nu_{zy} \frac{\sigma_z}{E_z}, \\ \varepsilon_z &= -\nu_{xz} \frac{\sigma_x}{E_x} - \nu_{yz} \frac{\sigma_y}{E_y} + \frac{\sigma_z}{E_z}, \quad \gamma_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{G_{ij}}, \quad i, j = x, y, \end{aligned} \quad (3.6)$$

где E – осевые модули упругости;

G – сдвиговые модули упругости;

ν – коэффициенты Пуассона;

ε – нормальные деформации;

γ – сдвиговые деформации;

σ – нормальные напряжения;

τ – касательные напряжения.

При этом между осевыми (нормальными) модулями E и коэффициентами ν существует три уравнения связи:

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j}, i, j = x, y, z, \quad (3.7)$$

так что общее число констант становится равным 9.

Если ввести обычную гипотезу о ненадавливании слоёв [149], т. е. считать, что $\sigma_z = 0$, то после разрешения уравнений (3.6), (3.7) относительно напряжений, получим:

$$\sigma_x = \frac{E_x}{\Delta}(\varepsilon_x + \nu_{yx}\varepsilon_y), \quad \sigma_y = \frac{E_y}{\Delta}(\varepsilon_y + \nu_{xy}\varepsilon_x), \quad (3.8)$$

$$\tau_{yz} = G_{yz}\gamma_{yz}, \quad \tau_{zx} = G_{zx}\gamma_{zx}, \quad \tau_{yx} = G_{yx}\gamma_{yx}, \quad (3.9)$$

где

$$\Delta = 1 - \nu_{xy}^2 \frac{E_y}{E_x} = 1 - \nu_{yx}^2 \frac{E_x}{E_y}, \quad (3.10)$$

для (3.9) выполняется закон парности касательных напряжений, а ν_{xy} и ν_{yx} связаны соотношением:

$$E_x \nu_{yx} = E_y \nu_{xy} \quad (3.11)$$

Теперь соотношения упругости (3.8)–(3.14) содержат шесть неизвестных параметров ортотропии, которые и подлежат определению.

В целях дальнейшего упрощения можно считать

$$E_x = E_y = E, \quad (3.12)$$

$$G_{zx} = G_{yz} = G. \quad (3.13)$$

После этого из (3.11) и (3.12) следует, что:

$$\nu_{xy} = \nu_{yx} = \nu. \quad (3.14)$$

После такого упрощения число упругих констант сокращается до четырёх.

В случае малых деформаций выражения для ε и γ в форме Коши [149] при аппроксимации поля перемещений в форме (3.4) получаются следующими:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} + z \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + z \frac{\partial \theta}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = 0, \\ \gamma_{xy} &= \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + z \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \right), \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \varphi, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \theta.\end{aligned}\tag{3.15}$$

Следует отметить, что последние два уравнения в (3.15) означают отказ от формализации Кирхгофа и учёт конечности сдвиговых деформаций (модели Тимошенко и Рейсснера [150]).

Выведем дифференциальные уравнения нашей задачи, используя вариационный принцип Лагранжа [151]:

$$\delta(\Pi - A) = 0,\tag{3.16}$$

где Π – потенциальная энергия.

В соответствии с принятой гипотезой о ненадавливании слоёв функционал потенциальной энергии будет:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{zx} \gamma_{zx} + \tau_{yz} \gamma_{yz}),\tag{3.17}$$

где интегрирование проводится по объёму модели.

Подставляя в (3.17) выражения (3.8), (3.9) и (3.15), производя варьирование и введя в слагаемые с τ_{zx} и τ_{yz} коэффициенты формы сечения k (используемые в сдвиговых моделях Тимошенко-Рейсснера), получим после интегрирования по толщине¹⁰:

$$\begin{aligned}\delta\Pi &= \int_{x,y} \left[\frac{E_x h_1}{\Delta} (u_x + v_{yx} v_y) \delta u_x + \frac{E_x h_3}{\Delta} (\varphi_x + v_{yx} \theta_y) \delta \varphi_x + \right. \\ &+ \frac{E_y h_1}{\Delta} (v_y + v_{xy} u_x) \delta v_y + \frac{E_x h_3}{\Delta} (\theta_y + v_{xy} \varphi_x) \delta \theta_y + \\ &+ G_{xy} h_1 (u_y + v_x) (\delta u_y + \delta v_x) + G_{xy} h_3 (\varphi_y + \theta_x) (\delta \varphi_y + \delta \theta_x) + \\ &\left. + k h_1 G_{zx} (w_x + \varphi) (\delta w_x + \delta \varphi) + k h_1 G_{yz} (w_y + \theta) (\delta w_y + \delta \theta) \right],\end{aligned}\tag{3.18}$$

где $h_1 = h$, $h_3 = \frac{h^3}{12}$.

В случае панели постоянной толщины коэффициент формы сечения k можно принять как для полосы [152]:

¹⁰ Индексы x и y при перемещениях u, v, w, φ, θ в (3.18) обозначают частное дифференцирование по одноимённому индексу

$$k = \frac{5}{6}.$$

Это несколько больше, чем рекомендация для изотропного случая у С. П. Тимошенко [149]:

$$k = \frac{20}{24 + 6\nu}, \quad (3.19)$$

однако, вследствие приближённости решения, такое уточнение не будет существенным (и обоснованным).

Применяя к (3.18) формулу Грина [153], можно получить для нашей задачи полную систему разрешающих уравнений, состоящую из системы дифференциальных уравнений в частных производных и набора допустимых краевых условий (главных и естественных). Однако, поступим в целях упрощения несколько иначе, перейдя к системе обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ).

3.2 Сведение к системе обыкновенных дифференциальных уравнений

Для решения указанной задачи используем метод частичного интегрирования Л. В. Канторовича [154], аппроксимируя функции перемещений двух переменных из (3.4) произведением одномерных функций, одну из которых, а именно – по координате x будем задавать заранее. Естественное желание упрощения вычислений приводит к выводу о желательности использования полиномиальных функций, а угроза возникновения вырождения полученного решения из-за вероятного возникновения псевдогильбертовых матриц [155] – к выводу о необходимости введения компактных носителей вместо глобальных. Решение задачи, показанной на рисунке 3.1, будет, скорее всего, весьма гладким (внутри области интегрирования нет точек Дирихле), поэтому используем в качестве компактных носителей кубические сплайны [156], задавая их на отрезке $x \in [0; l]$. Присвоив точке $x = 0$ индекс «н», а точке $x = l$ – индекс «к» и введя обозначение:

$$(\cdot)' = \frac{d}{dx},$$

получим выражение для сплайна f и его первой производной f' в виде:

$$\begin{aligned}
f &= f_{\text{н}}\psi_1 + f'_{\text{н}}l\psi_2 + f_{\text{к}}\psi_3 + f'_{\text{к}}l\psi_4, \\
f' &= \frac{1}{l}f_{\text{н}}\psi_5 + f'_{\text{н}}\psi_6 - \frac{1}{l}f_{\text{к}}\psi_5 + f'_{\text{к}}\psi_7,
\end{aligned} \tag{3.20}$$

где функции ψ_i имеют вид:

$$\begin{aligned}
\psi_1 &= 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3, \quad \psi_2 = \xi - 2\xi^2 + \xi^3, \quad \psi_3 = 3\xi^2 - 2\xi^3, \\
\psi_4 &= \xi^3 - \xi^2, \quad \psi_5 = 6\xi^2 - 6\xi, \quad \psi_6 = 1 - 4\xi + 3\xi^2, \\
\psi_7 &= 3\xi^2 - 2\xi, \quad \xi = \frac{x}{l}.
\end{aligned} \tag{3.21}$$

В дальнейшем будем считать, что весь x -материал интегрирования разбит на участки одинаковой длины l . Для того, чтобы избежать загромождения текста различными индексами, дальнейшие выкладки будем производить для x -разбиения на пять участков, содержащего шесть точек, как это показано на рисунке 3.2.

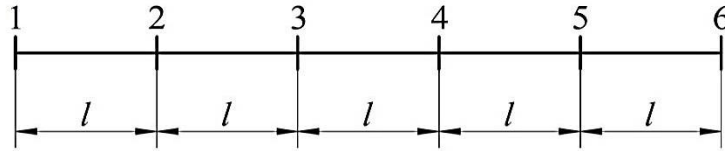


Рисунок 3.2 – Пример x -разбиения материала интегрирования

Выражения для вторых производных (по материальной координате x , а не по ξ) сплайн-аппроксимации (3.20) в конечных точках сплайнов имеют вид:

$$\begin{aligned}
f''_{\text{н}} &= \frac{6}{l^2}(f_{\text{к}} - f_{\text{н}}) - \frac{4}{l}f'_{\text{н}} - \frac{2}{l}f'_{\text{к}}, \\
f''_{\text{к}} &= \frac{6}{l^2}(f_{\text{н}} - f_{\text{к}}) + \frac{2}{l}f'_{\text{н}} + \frac{4}{l}f'_{\text{к}}.
\end{aligned} \tag{3.22}$$

Требования их непрерывности в точках склеивания приводит к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) следующего вида:

$$\mathbf{H}_1 \vec{b} = \mathbf{H}_2 \vec{a} \tag{3.23}$$

Для примера по рисунку 3.2 векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ имеют вид:

$$\begin{aligned}
\vec{a} &= \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f'_1, f'_6\}, \\
\vec{b} &= \{f'_2, f'_3, f'_4, f'_5\},
\end{aligned} \tag{3.24}$$

а матрицы $\mathbf{H}_1$ и $\mathbf{H}_2$ – следующий:

$$H_1 = \begin{bmatrix} 4k_1 & k_1 & & \\ k_1 & 4k_1 & k_1 & \\ & k_1 & 4k_1 & k_1 \\ & & k_1 & 4k_1 \end{bmatrix},$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} -k_2 & & k_2 & & & & -k_1 \\ & -k_2 & & k_2 & & & \\ & & -k_2 & & k_2 & & \\ & & & -k_2 & & k_2 & -k_1 \end{bmatrix}, \quad (3.25)$$

где $k_1 = \frac{2}{l}, k_2 = \frac{6}{l^2}$.

Вычислим из (3.23) вектор $\vec{b}$:

$$\vec{b} = \mathbf{H}_1^{-1} \mathbf{H}_2 \vec{a} \quad (3.26)$$

и образуем вектор $\vec{q}$ следующим образом:

$$\vec{q} = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f'_1, f'_2, f'_3, f'_4, f'_5, f'_6\}. \quad (3.27)$$

Тогда, с учётом (3.26) сможем записать:

$$\vec{q} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \\ f'_1 \\ f'_2 \\ f'_3 \\ f'_4 \\ f'_5 \\ f'_6 \end{pmatrix} = \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c} f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 & f_6 & f'_1 & f'_6 \\ \hline & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ \hline & & & & & & 1 & \\ \hline & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ \hline & & & & & & & 1 \end{array} \vec{a} = \mathbf{H} \vec{a}, \quad (3.28)$$

где I – единичная матрица.

Введём теперь аппроксимацию:

$$F(x, y) = F(y)f(x), \quad (3.29)$$

где под F понимаются перемещения u , v и т. д., а f – кубические сплайны по (3.20), (3.21). Обозначив теперь:

$$C_1 = \frac{1}{\Lambda} E_x h_1, \quad C_2 = \frac{1}{\Lambda} E_x h_1 v_{yx} = \frac{1}{\Lambda} E_y h_1 v_{xy}, \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned}
C_3 &= \frac{1}{\Delta} E_x h_3, \quad C_4 = \frac{1}{\Delta} E_x h_3 v_{yx} = \frac{1}{\Delta} E_y h_3 v_{xy}, \\
C_5 &= \frac{1}{\Delta} E_y h_1, \quad C_6 = \frac{1}{\Delta} E_y h_3, \quad C_7 = G_{xy} h_1, \\
C_8 &= G_{xy} h_3, \quad C_9 = k h_1 G_{zx}, \quad C_{10} = k h_1 G_{yz},
\end{aligned}$$

перепишем функционал (3.18) в виде:

$$\begin{aligned}
\delta \Pi = \int_{x,y} [& (C_1 u_x + C_2 v_y) \delta u_x + (C_3 \varphi_x + C_4 \theta_y) \delta \varphi_x + (C_5 v_y + C_2 u_x) \delta v_y + \\
& + (C_6 \theta_y + C_4 \varphi_x) \delta \theta_y + C_7 (u_y + v_x) (\delta u_y + \delta v_x) + C_8 (\varphi_y + \theta_x) (\delta \varphi_y + \delta \theta_x) + \\
& + C_9 (w_x + \varphi) (\delta w_x + \delta \varphi) + C_{10} (w_y + \theta) (\delta w_y + \delta \theta)].
\end{aligned} \quad (3.31)$$

После этого для F по (3.29) на основании (3.20) можем записать:

$$\begin{aligned}
F(x, y) &= F(x_h, y) \psi_1 + \bar{F}(x_h, y) l \psi_2 + F(x_k, y) \psi_3 + \bar{F}(x_k, y) l \psi_4, \\
F_x(x, y) &= \frac{1}{l} F(x_h, y) \psi_5 + \bar{F}(x_h, y) \psi_6 - \frac{1}{l} F(x_k, y) \psi_5 + \bar{F}(x_k, y) \psi_7.
\end{aligned} \quad (3.32)$$

Обозначив:

$$F_i(x_i, y) = F_i,$$

получим:

$$\begin{aligned}
F(x, y) &= F_h \psi_1 + \bar{F}_h l \psi_2 + F_k \psi_3 + \bar{F}_k l \psi_4, \\
F_x(x, y) &= \frac{1}{l} F_h \psi_5 + \bar{F}_h \psi_6 - \frac{1}{l} F_k \psi_5 + \bar{F}_k \psi_7, \quad F = u, v, w, \varphi, \theta.
\end{aligned} \quad (3.33)$$

Введём теперь векторы:

$$\vec{F}(y) = \{F_h, F_k, \bar{F}_h, \bar{F}_k\}, \quad F = u, v, w, \varphi, \theta, \quad (3.34)$$

а также, учитывая (3.20):

$$\vec{\alpha}_0 = \{\psi_1, \psi_3, l\psi_2, l\psi_4\}, \quad \vec{\alpha}_1 = \left\{\frac{1}{l}\psi_5, -\frac{1}{l}\psi_5, \psi_6, \psi_7\right\}. \quad (3.35)$$

Тогда можно записать¹¹:

$$\begin{aligned}
F(x, y) &= \vec{\alpha}_0^* \vec{F}(y), \quad F_x(x, y) = \vec{\alpha}_1^* \vec{F}(y), \\
F_y(x, y) &= \vec{\alpha}_0^* \vec{F}'(y), \quad F = u, v, w, \varphi, \theta.
\end{aligned} \quad (3.36)$$

Подставив (3.36) в функционал (3.31), получим:

¹¹ В последующих выкладках для обозначения производной по x будем вместо знака $(')$ использовать знак $(-)$, а знаком $(')$ будем обозначать производную по y : $(') = \frac{d}{dy}$. Также здесь и далее символом «*», поставленным в любом удобном месте будем обозначать операцию транспонирования.

$$\begin{aligned}
\delta\Pi = \int_{x,y} & [\delta\vec{u}_* \vec{\alpha}_1 (C_1 \vec{\alpha}_1^* \vec{u} + C_2 \vec{\alpha}_0^* \vec{v}') + \delta\vec{\varphi}_* \vec{\alpha}_1 (C_3 \vec{\alpha}_1^* \vec{\varphi} + C_4 \vec{\alpha}_0^* \vec{\theta}') + \\
& + \delta\vec{v}'_* \vec{\alpha}_0 (C_3 \vec{\alpha}_0^* \vec{v}' + C_2 \vec{\alpha}_1^* \vec{u}) + \delta\vec{\theta}'_* \vec{\alpha}_0 (C_6 \vec{\alpha}_0^* \vec{\theta}' + C_4 \vec{\alpha}_1^* \vec{\varphi}) + \\
& + \delta\vec{u}'_* \vec{\alpha}_0 C_7 (\vec{\alpha}_0^* \vec{u} + \vec{\alpha}_1^* \vec{v}) + \delta\vec{v}_* \vec{\alpha}_1 C_7 (\vec{\alpha}_0^* \vec{u}' + \vec{\alpha}_1^* \vec{v}) + \\
& + \delta\vec{\varphi}'_* \vec{\alpha}_0 C_8 (\vec{\alpha}_0^* \vec{\varphi}' + \vec{\alpha}_1^* \vec{\theta}) + \delta\vec{\theta}_* \vec{\alpha}_1 C_8 (\vec{\alpha}_0^* \vec{\varphi}' + \vec{\alpha}_1^* \vec{\theta}) + \\
& + \delta\vec{w}_* \vec{\alpha}_1 C_9 (\vec{\alpha}_1^* \vec{w} + \vec{\alpha}_0^* \vec{\varphi}) + \delta\vec{\varphi}_* \vec{\alpha}_0 C_9 (\vec{\alpha}_1^* \vec{w} + \vec{\alpha}_0^* \vec{\varphi}) + \\
& + \delta\vec{w}'_* \vec{\alpha}_0 C_{10} (\vec{\alpha}_0^* \vec{w}' + \vec{\alpha}_0^* \vec{\theta}) + \delta\vec{\theta}_* \vec{\alpha}_0 C_{10} (\vec{\alpha}_0^* \vec{w}' + \vec{\alpha}_0^* \vec{\theta})].
\end{aligned} \tag{3.37}$$

Если ввести в рассмотрение 4×4 интегральные матрицы:

$$A_{ij} = A_{ji}^* = l \int_0^1 \vec{\alpha}_i \vec{\alpha}_j^* d\xi, \tag{3.38}$$

то предыдущее выражение примет вид:

$$\begin{aligned}
\delta\Pi = \int_y & [\delta\vec{u}_* (C_1 \mathbf{A}_{11} \vec{u} + C_2 \mathbf{A}_{10} \vec{v}') + \delta\vec{v}_* (C_7 \mathbf{A}_{10} \vec{u}' + C_7 \mathbf{A}_{11} \vec{v}) + \\
& + \delta\vec{w}_* (C_9 \mathbf{A}_{11} \vec{w} + C_9 \mathbf{A}_{10} \vec{\varphi}) + \delta\vec{\varphi}_* (C_3 \mathbf{A}_{11} \vec{\varphi} + C_4 \mathbf{A}_{10} \vec{\theta}' + C_9 \mathbf{A}_{10}^* \vec{w}' + C_9 \mathbf{A}_{00} \vec{\varphi}) + \\
& + \delta\vec{\theta}_* (C_8 \mathbf{A}_{10} \vec{\varphi}' + C_8 \mathbf{A}_{11} \vec{\theta} + C_{10} \mathbf{A}_{00} \vec{w}' + C_{10} \mathbf{A}_{00} \vec{\theta}) + \delta\vec{u}'_* (C_7 \mathbf{A}_{00} \vec{u}' + C_7 \mathbf{A}_{10}^* \vec{v}) + \\
& + \delta\vec{v}'_* (C_5 \mathbf{A}_{00} \vec{v}' + C_2 \mathbf{A}_{10}^* \vec{u}) + \delta\vec{w}'_* (C_{10} \mathbf{A}_{00} \vec{w}' + C_{10} \mathbf{A}_{00} \vec{\theta}) + \\
& + \delta\vec{\varphi}'_* (C_8 \mathbf{A}_{00} \vec{\varphi}' + C_8 \mathbf{A}_{10}^* \vec{\theta}) + \delta\vec{\theta}'_* (C_6 \mathbf{A}_{00} \vec{\theta}' + C_4 \mathbf{A}_{10}^* \vec{\varphi})] dy.
\end{aligned} \tag{3.39}$$

Где значения коэффициентов матриц:

$$\begin{aligned}
\mathbf{A}_{00} &= \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ a_2 & a_5 & a_6 & a_7 \\ a_3 & a_6 & a_8 & a_9 \\ a_4 & a_7 & a_9 & a_{10} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{11} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{12} & a_{15} & a_{16} & a_{17} \\ a_{13} & a_{16} & a_{18} & a_{19} \\ a_{14} & a_{17} & a_{19} & a_{20} \end{bmatrix}, \\
\mathbf{A}_{10} &= \begin{bmatrix} a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{25} & a_{26} & a_{27} & a_{28} \\ a_{29} & a_{30} & a_{31} & a_{32} \\ a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \end{bmatrix},
\end{aligned}$$

полученные по формулам (3.38), следующие:

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{13}{35} l \left(\frac{156}{420} l \right), a_2 = \frac{9}{70} l \left(\frac{54}{420} l \right), a_3 = \frac{11}{210} l^2 \left(\frac{22}{420} l^2 \right), a_4 = -\frac{13}{420} l^2, \\
a_5 &= \frac{13}{35} l \left(\frac{156}{420} l \right), a_6 = \frac{13}{420} l^2, a_7 = -\frac{11}{210} l^2 \left(-\frac{22}{420} l^2 \right), a_8 = \frac{1}{105} l^3 \left(\frac{4}{420} l^3 \right), \\
a_9 &= -\frac{1}{140} l^3 \left(-\frac{3}{420} l^3 \right), a_{10} = \frac{1}{105} l^3 \left(\frac{4}{420} l^3 \right), a_{11} = \frac{6}{5l} \left(\frac{504}{420l} \right),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{12} &= -\frac{6}{5l} \left(-\frac{504}{420l} \right), a_{13} = \frac{1}{10} \left(\frac{42}{420} \right), a_{14} = \frac{1}{10} \left(\frac{42}{420} \right), a_{15} = \frac{6}{5l} \left(\frac{504}{420l} \right), \\
a_{16} &= -\frac{1}{10} \left(-\frac{42}{420} \right), a_{17} = -\frac{1}{10} \left(\frac{-42}{420} \right), a_{18} = \frac{2}{15} l \left(\frac{56}{420} l \right), \\
a_{19} &= -\frac{1}{30} l \left(-\frac{14}{420} l \right), a_{20} = \frac{2}{15} l \left(\frac{56}{420} l \right), a_{21} = -\frac{1}{2} \left(-\frac{210}{420} \right), \\
a_{22} &= -\frac{1}{2} \left(-\frac{210}{420} \right), a_{23} = -\frac{1}{10} l \left(-\frac{42}{420} l \right), a_{24} = \frac{1}{10} l \left(\frac{42}{420} l \right), \\
a_{25} &= \frac{1}{2} \left(\frac{210}{420} \right), a_{26} = \frac{1}{2} \left(\frac{210}{420} \right), a_{27} = \frac{1}{10} l \left(\frac{42}{420} l \right), \\
a_{28} &= -\frac{1}{10} l \left(-\frac{42}{420} l \right), a_{29} = \frac{1}{10} l \left(\frac{42}{420} l \right), a_{30} = -\frac{1}{10} l \left(-\frac{42}{420} l \right), \\
a_{31} &= 0, a_{32} = \frac{1}{60} l^2 \left(\frac{7}{420} l^2 \right), a_{33} = -\frac{1}{10} l \left(-\frac{42}{420} l \right), \\
a_{34} &= \frac{1}{10} l \left(\frac{42}{420} l \right), a_{35} = -\frac{1}{60} l^2 \left(-\frac{7}{420} l^2 \right), a_{36} = 0.
\end{aligned}$$

Если по аналогии с (3.35) ввести в рассмотрение векторы $\vec{q}_u, \vec{q}_v, \dots, \vec{q}_\theta, \vec{q}_{u'}, \vec{q}_{v'}, \dots, \vec{q}_{\theta'}$, связанные соотношением вида (3.28) (где фигурируют векторы $\vec{a}_u, \vec{a}_v$ и т. д.), то функционал (3.39) перепишется в виде:

$$\begin{aligned}
\delta \Pi = \int_y & [\delta \vec{q}_u^* (C_1 \bar{\mathbf{D}}_1 \vec{q}_u + C_2 \bar{\mathbf{D}}_2 \vec{q}_{v'}) + \delta \vec{q}_v^* (C_7 \bar{\mathbf{D}}_2 \vec{q}_{u'} + C_7 \bar{\mathbf{D}}_1 \vec{q}_v) + \\
& + \delta \vec{q}_w^* (C_9 \bar{\mathbf{D}}_1 \vec{q}_w + C_9 \bar{\mathbf{D}}_2 \vec{q}_\varphi) + \delta \vec{q}_\varphi^* (C_3 \bar{\mathbf{D}}_1 \vec{q}_\varphi + C_4 \bar{\mathbf{D}}_2 \vec{q}_{\theta'} + C_9 \bar{\mathbf{D}}_2^* \vec{q}_w + C_9 \bar{\mathbf{D}}_3 \vec{q}_\varphi) + \\
& + \delta \vec{q}_\theta^* (C_8 \bar{\mathbf{D}}_2 \vec{q}_{\varphi'} + C_8 \bar{\mathbf{D}}_1 \vec{q}_\theta + C_{10} \bar{\mathbf{D}}_3 \vec{q}_{w'} + C_{10} \bar{\mathbf{D}}_3 \vec{q}_\theta) + \delta \vec{q}_{u'}^* (C_7 \bar{\mathbf{D}}_3 \vec{q}_{u'} + C_7 \bar{\mathbf{D}}_2^* \vec{q}_v) + \\
& + \delta \vec{q}_{v'}^* (C_5 \bar{\mathbf{D}}_3 \vec{q}_{v'} + C_2 \bar{\mathbf{D}}_2^* \vec{q}_u) + \delta \vec{q}_{w'}^* (C_{10} \bar{\mathbf{D}}_3 \vec{q}_{w'} + C_{10} \bar{\mathbf{D}}_3 \vec{q}_\theta) + \\
& + \delta \vec{q}_{\varphi'}^* (C_8 \bar{\mathbf{D}}_3 \vec{q}_{\varphi'} + C_8 \bar{\mathbf{D}}_2^* \vec{q}_\theta) + \delta \vec{q}_{\theta'}^* (C_6 \bar{\mathbf{D}}_3 \vec{q}_{\theta'} + C_4 \bar{\mathbf{D}}_2^* \vec{q}_\varphi)].
\end{aligned} \tag{3.40}$$

В (3.40) введены блочные матрицы:

$$\bar{\mathbf{D}}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 & \mathbf{B}_2^* \\ \mathbf{B}_2 & \mathbf{B}_3 \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{D}}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_4 & \mathbf{B}_6 \\ \mathbf{B}_5 & \mathbf{B}_7 \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{D}}_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_8 & \mathbf{B}_9^* \\ \mathbf{B}_9 & \mathbf{B}_{10} \end{bmatrix}. \tag{3.41}$$

При этом сами квадратные матрицы $\mathbf{B}_i$ имеют порядок, равный количеству точек в x -разбиении. Для примера на рисунке 3.2 эти матрицы имеют вид:

$$\begin{aligned}
B_1 &= \left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c} a_{11} & a_{12} & & & & \\ \hline a_{12} & a_{11} + a_{15} & a_{12} & & & \\ \hline & a_{12} & a_{11} + a_{15} & a_{12} & & \\ \hline & & a_{12} & a_{11} + a_{15} & a_{12} & \\ \hline & & & a_{12} & a_{11} + a_{15} & a_{12} \\ \hline & & & & a_{12} & a_{15} \end{array} \right], \\
B_2 &= \left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c} a_{13} & a_{16} & & & & \\ \hline a_{14} & a_{13} + a_{17} & a_{16} & & & \\ \hline & a_{14} & a_{13} + a_{17} & a_{16} & & \\ \hline & & a_{14} & a_{13} + a_{17} & a_{16} & \\ \hline & & & a_{14} & a_{13} + a_{17} & a_{16} \\ \hline & & & & a_{14} & a_{17} \end{array} \right], \\
B_3 &= \left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c} a_{18} & a_{19} & & & & \\ \hline a_{19} & a_{18} + a_{20} & a_{19} & & & \\ \hline & a_{19} & a_{18} + a_{20} & a_{19} & & \\ \hline & & a_{19} & a_{18} + a_{20} & a_{19} & \\ \hline & & & a_{19} & a_{18} + a_{20} & a_{19} \\ \hline & & & & a_{19} & a_{20} \end{array} \right], \\
B_4 &= \left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c} a_{21} & a_{22} & & & & \\ \hline a_{25} & a_{21} + a_{26} & a_{22} & & & \\ \hline & a_{25} & a_{21} + a_{26} & a_{22} & & \\ \hline & & a_{25} & a_{21} + a_{26} & a_{22} & \\ \hline & & & a_{25} & a_{21} + a_{26} & a_{22} \\ \hline & & & & a_{25} & a_{26} \end{array} \right], \\
B_5 &= \left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c} a_{29} & a_{30} & & & & \\ \hline a_{33} & a_{29} + a_{34} & a_{30} & & & \\ \hline & a_{33} & a_{29} + a_{34} & a_{30} & & \\ \hline & & a_{33} & a_{29} + a_{34} & a_{30} & \\ \hline & & & a_{33} & a_{29} + a_{34} & a_{30} \\ \hline & & & & a_{33} & a_{34} \end{array} \right], \\
B_6 &= \left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c} a_{23} & a_{24} & & & & \\ \hline a_{27} & a_{23} + a_{28} & a_{24} & & & \\ \hline & a_{27} & a_{23} + a_{28} & a_{24} & & \\ \hline & & a_{27} & a_{23} + a_{28} & a_{24} & \\ \hline & & & a_{27} & a_{23} + a_{28} & a_{24} \\ \hline & & & & a_{27} & a_{28} \end{array} \right],
\end{aligned} \tag{3.42}$$

$$\begin{aligned}
B_7 &= \left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c} a_{31} & a_{32} & & & & \\ \hline a_{35} & a_{31} + a_{36} & a_{32} & & & \\ \hline & a_{35} & a_{31} + a_{36} & a_{32} & & \\ \hline & & a_{35} & a_{31} + a_{36} & a_{32} & \\ \hline & & & a_{35} & a_{31} + a_{36} & a_{32} \\ \hline & & & & a_{35} & a_{36} \end{array} \right], \\
B_8 &= \left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c} a_1 & a_2 & & & & \\ \hline a_2 & a_1 + a_5 & a_2 & & & \\ \hline & a_2 & a_1 + a_5 & a_2 & & \\ \hline & & a_2 & a_1 + a_5 & a_2 & \\ \hline & & & a_2 & a_1 + a_5 & a_2 \\ \hline & & & & a_2 & a_5 \end{array} \right], \\
B_9 &= \left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c} a_3 & a_6 & & & & \\ \hline a_4 & a_3 + a_7 & a_6 & & & \\ \hline & a_4 & a_3 + a_7 & a_6 & & \\ \hline & & a_4 & a_3 + a_7 & a_6 & \\ \hline & & & a_4 & a_3 + a_7 & a_6 \\ \hline & & & & a_4 & a_7 \end{array} \right], \\
B_{10} &= \left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c} a_8 & a_9 & & & & \\ \hline a_9 & a_8 + a_{10} & a_9 & & & \\ \hline & a_9 & a_8 + a_{10} & a_9 & & \\ \hline & & a_9 & a_8 + a_{10} & a_9 & \\ \hline & & & a_9 & a_8 + a_9 & a_9 \\ \hline & & & & a_{10} & a_{10} \end{array} \right].
\end{aligned} \tag{3.42}$$

Учитывая соотношения вида (3.28) и введя векторы $\vec{a}(y)$, которые для схемы рисунка 3.2 имеют вид:

$$\begin{aligned}
\vec{a}_u &= \{u_1 u_2 u_3 u_4 u_5 u_6 \bar{u}_1 \bar{u}_6\}, \\
\vec{a}_v &= \{v_1 v_2 v_3 v_4 v_5 v_6 \bar{v}_1 \bar{v}_6\}, \\
\vec{a}_w &= \{w_1 w_2 w_3 w_4 w_5 w_6 \bar{w}_1 \bar{w}_6\}, \\
\vec{a}_\varphi &= \{\varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \varphi_4 \varphi_5 \varphi_6 \bar{\varphi}_1 \bar{\varphi}_6\}, \\
\vec{a}_\theta &= \{\theta_1 \theta_2 \theta_3 \theta_4 \theta_5 \theta_6 \bar{\theta}_1 \bar{\theta}_6\},
\end{aligned} \tag{3.43}$$

а также обозначив:

$$D_i = H^* \bar{D}_i H, i = \overline{1, 3}, \tag{3.44}$$

получим вместо (3.40) следующее выражение:

$$\begin{aligned}
\delta\Pi = \int_y & [\delta\vec{a}_u^*(C_1\mathbf{D}_1\vec{a}_u + C_2\mathbf{D}_2\vec{a}_{v'}) + \delta\vec{a}_v^*(C_7\mathbf{D}_2\vec{a}_{u'} + C_7\mathbf{D}_1\vec{a}_v) + \\
& + \delta\vec{a}_w^*(C_9\mathbf{D}_1\vec{a}_w + C_9\mathbf{D}_2\vec{a}_\varphi) + \delta\vec{a}_\varphi^*([C_3\mathbf{D}_1 + C_9\mathbf{D}_3]\vec{a}_\varphi + C_4\mathbf{D}_2\vec{a}_{\theta'} + C_9\mathbf{D}_2^*\vec{a}_w) + \\
& + \delta\vec{a}_\theta^*(C_8\mathbf{D}_2\vec{a}_{\varphi'} + [C_8\mathbf{D}_1 + C_{10}\mathbf{D}_3]\vec{a}_\theta + C_{10}\mathbf{D}_3\vec{a}_{w'}) + \\
& + \delta\vec{a}_{u'}^*(C_7\mathbf{D}_3\vec{a}_{u'} + C_7\mathbf{D}_2^*\vec{a}_v) + \delta\vec{a}_{v'}^*(C_5\mathbf{D}_3\vec{a}_{v'} + C_2\mathbf{D}_2^*\vec{a}_u) + \\
& + \delta\vec{a}_{w'}^*(C_{10}\mathbf{D}_3\vec{a}_{w'} + C_{10}\mathbf{D}_3\vec{a}_\theta) + \delta\vec{a}_{\varphi'}^*(C_8\mathbf{D}_3\vec{a}_{\varphi'} + C_8\mathbf{D}_2^*\vec{a}_\theta) + \\
& + \delta\vec{a}_{\theta'}^*(C_6\mathbf{D}_3\vec{a}_{\theta'} + C_4\mathbf{D}_2^*\vec{a}_\varphi)].
\end{aligned} \tag{3.45}$$

Теперь, чтобы воспользоваться принципом Лагранжа в виде (3.16), остаётся вычислить вариацию работы кромочных усилий из (3.5). Для схемы нагружения по рисунку 3.1 и при x -разбиении материала интегрирования по рисунку 3.2, получим:

$$\begin{aligned}
\delta A = \int_y & (p_1 h_1 \delta u_1 + q_1 h_3 \delta \varphi_1 + p_6 h_1 \delta u_6 + q_6 h_3 \delta \varphi_6 + s_1 h_1 \delta v_1 + \\
& + t_1 h_3 \delta \theta_1 + s_6 h_1 \delta v_6 + t_6 h_3 \delta \theta_6 + r_1 h_1 \delta w_1 + r_6 h_1 \delta w_6).
\end{aligned} \tag{3.46}$$

Если теперь ввести векторы:

$$\begin{aligned}
\vec{b}_u &= \{p_1 h_1, 0, 0, 0, 0, p_6 h_1, 0, 0\}, \\
\vec{b}_v &= \{s_1 h_1, 0, 0, 0, 0, s_6 h_1, 0, 0\}, \\
\vec{b}_w &= \{r_1 h_1, 0, 0, 0, 0, r_6 h_1, 0, 0\}, \\
\vec{b}_\varphi &= \{q_1 h_3, 0, 0, 0, 0, q_6 h_3, 0, 0\}, \\
\vec{b}_\theta &= \{t_1 h_3, 0, 0, 0, 0, t_6 h_3, 0, 0\},
\end{aligned} \tag{3.47}$$

то предыдущее выражение примет вид:

$$\delta A = \int_y (\delta\vec{a}_u^* \vec{b}_u + \delta\vec{a}_v^* \vec{b}_v + \delta\vec{a}_w^* \vec{b}_w + \delta\vec{a}_\varphi^* \vec{b}_\varphi + \delta\vec{a}_\theta^* \vec{b}_\theta). \tag{3.48}$$

Прежде, чем подставлять (3.45) и (3.48) в вариационное уравнение (3.16), введём в (3.45) интегральные усилия следующего вида:

$$\begin{aligned}
\vec{N}_u &= C_7 \mathbf{D}_3 \vec{a}'_u + C_7 \mathbf{D}_2^* \vec{a}_v, \\
\vec{N}_v &= C_5 \mathbf{D}_3 \vec{a}'_v + C_2 \mathbf{D}_2^* \vec{a}_u, \\
\vec{N}_w &= C_{10} \mathbf{D}_3 \vec{a}'_w + C_{10} \mathbf{D}_3 \vec{a}_\theta, \\
\vec{N}_\varphi &= C_8 \mathbf{D}_3 \vec{a}'_\varphi + C_8 \mathbf{D}_2^* \vec{a}_\theta,
\end{aligned} \tag{3.49}$$

$$\vec{N}_\theta = C_6 \mathbf{D}_3 \vec{a}'_\theta + C_4 \mathbf{D}_2^* \vec{a}_\varphi. \quad (3.49)$$

Тогда для вариации внутренней энергии у нас получится:

$$\begin{aligned} \delta U = \delta(\Pi - A) = & \int \left\{ \delta \vec{a}_u^* (C_1 \mathbf{D}_1 \vec{a}_u + C_2 \mathbf{D}_2 \vec{a}'_v - \vec{b}_u) + \right. \\ & + \delta \vec{a}_v^* (C_7 \mathbf{D}_2 \vec{a}'_u + C_7 \mathbf{D}_1 \vec{a}_v - \vec{b}_v) + \delta \vec{a}_w^* (C_9 \mathbf{D}_1 \vec{a}_w + C_9 \mathbf{D}_2 \vec{a}_\varphi - \vec{b}_w) + \\ & + \delta \vec{a}_\varphi^* [(C_3 \mathbf{D}_1 + C_9 \mathbf{D}_3) \vec{a}_\varphi + C_4 \mathbf{D}_2 \vec{a}'_\theta + C_9 \mathbf{D}_2^* \vec{a}_w - \vec{b}_\varphi] + \\ & + \delta \vec{a}_\theta^* [C_8 \mathbf{D}_2 \vec{a}'_\varphi + (C_8 \mathbf{D}_1 + C_{10} \mathbf{D}_3) \vec{a}_\theta + C_{10} \mathbf{D}_3 \vec{a}'_w - \vec{b}_\theta] + \\ & \left. + \delta \vec{a}_u^* \vec{N}_u + \delta \vec{a}_v^* \vec{N}_v + \delta \vec{a}_w^* \vec{N}_w + \delta \vec{a}_\varphi^* (C_8 \mathbf{D}_3 \vec{a}'_\varphi + C_8 \mathbf{D}_2^* \vec{a}_\theta) \right\}. \end{aligned} \quad (3.50)$$

Производя в (3.50) интегрирование по частям, получим эйлерову СОДУ равновесия для интегральных усилий (3.49):

$$\begin{aligned} \vec{N}'_u &= C_1 \mathbf{D}_1 \vec{a}_u + C_2 \mathbf{D}_2 \vec{a}'_v - \vec{b}_u, \\ \vec{N}'_v &= C_7 \mathbf{D}_2 \vec{a}'_u + C_7 \mathbf{D}_1 \vec{a}_v - \vec{b}_v, \\ \vec{N}'_w &= C_9 \mathbf{D}_1 \vec{a}_w + C_9 \mathbf{D}_2 \vec{a}_\varphi - \vec{b}_w, \\ \vec{N}'_\varphi &= (C_3 \mathbf{D}_1 + C_9 \mathbf{D}_3) \vec{a}_\varphi + C_4 \mathbf{D}_2 \vec{a}'_\theta + C_9 \mathbf{D}_2^* \vec{a}_w - \vec{b}_\varphi, \\ \vec{N}'_\theta &= C_8 \mathbf{D}_2 \vec{a}'_\varphi + (C_8 \mathbf{D}_1 + C_{10} \mathbf{D}_3) \vec{a}_\theta + C_{10} \mathbf{D}_3 \vec{a}'_w - \vec{b}_\theta, \end{aligned} \quad (3.51)$$

а также набор возможных краевых условий [157] в виде внеинтегральных членов функционала (3.45):

$$(\delta \vec{a}_u^* \vec{N}_u + \delta \vec{a}_v^* \vec{N}_v + \delta \vec{a}_w^* \vec{N}_w + \delta \vec{a}_\varphi^* \vec{N}_\varphi + \delta \vec{a}_\theta^* \vec{N}_\theta) \Big|_y = 0. \quad (3.52)$$

СОДУ по (3.49) и (3.51) удобно записать, введя блочные векторы (для примера по рисунку 3.2 эти блоки имеют восьмой порядок (см. формулу (3.28)):

$$\begin{aligned} \vec{a} &= \{\vec{a}_u \vec{a}_v \vec{a}_w \vec{a}_\varphi \vec{a}_\theta\}, \\ \vec{N} &= \{\vec{N}_u \vec{N}_v \vec{N}_w \vec{N}_\varphi \vec{N}_\theta\}, \\ \vec{b} &= \{\vec{b}_u \vec{b}_v \vec{b}_w \vec{b}_\varphi \vec{b}_\theta\}. \end{aligned} \quad (3.53)$$

Тогда вместо (3.49) получится:

$$\vec{N} = \mathbf{E} \vec{a} + \mathbf{G} \vec{a}', \quad (3.54)$$

где:

$$\mathbf{E} = \left[\begin{array}{c|c|c|c|c} & C_7 D_2^* & & & \\ \hline C_2 D_2^* & & & & \\ \hline & & & & C_{10} D_3 \\ & & & & C_8 D_2^* \\ \hline & & & C_4 D_2^* & \end{array} \right], \quad (3.55)$$

$$\mathbf{G} = \text{diag}(C_7 D_3, C_5 D_3, C_{10} D_3, C_8 D_3, C_6 D_3).$$

Аналогично, вместо (3.51) запишем:

$$\vec{N}' = \mathbf{M} \vec{a} + \mathbf{E}_* \vec{a}' - \vec{b}, \quad (3.56)$$

где:

$$\mathbf{M} = \left[\begin{array}{c|c|c|c|c} C_1 D_1 & & & & \\ \hline & C_7 D_1 & & & \\ \hline & & C_9 D_1 & C_9 D_2 & \\ \hline & & C_9 D_2^* & C_3 D_1 + C_9 D_3 & \\ \hline & & & & C_8 D_1 + C_{10} D_3 \end{array} \right]. \quad (3.57)$$

Найдя из (3.54) $\vec{a}'$:

$$\vec{a}' = \mathbf{G}^{-1}(\vec{N} - \mathbf{E} \vec{a}), \quad (3.58)$$

и подставив его в (3.56), получим:

$$\vec{N}' = (\mathbf{M} - \mathbf{E}_* \mathbf{G}^{-1} \mathbf{E}) \vec{a} + \mathbf{E}_* \mathbf{G}^{-1} \vec{N} - \vec{b}. \quad (3.59)$$

Объединим окончательно векторы $\vec{a}$ и $\vec{N}$ в блочно-блочный вектор:

$$\vec{y} = \{\vec{a}, \vec{N}\}. \quad (3.60)$$

После этого получается векторная СОДУ следующего вида:

$$\vec{y}' = \mathbf{L} \vec{y} + \vec{n}, \quad (3.61)$$

где блочно-блочная матрица $\mathbf{L}$ имеет вид

$$\mathbf{L} = \left[\begin{array}{c|c} -\mathbf{G}^{-1} \mathbf{E} & \mathbf{G}^{-1} \\ \hline \mathbf{M} - \mathbf{E}_* \mathbf{G}^{-1} \mathbf{E} & \mathbf{E}_* \mathbf{G}^{-1} \end{array} \right], \quad (3.62)$$

а вектор $\vec{n}$ следующий:

$$\vec{n} = \{\vec{0}, -\vec{b}\}. \quad (3.63)$$

СОДУ (3.61) следует решать при краевых условиях, вытекающих из (3.52). Однако, как отмечалось ранее, целесообразно это делать для нулевых значений вектора $\vec{a}$ в концевых точках.

Решение (3.61) в общем случае получается каким-либо численным методом. Однако в одном практически важном случае этого можно частично избежать: если нагрузочный вектор $\vec{n}$ является постоянным. В этом случае (вследствие постоянства матрицы L) мы имеем очевидное частное решение:

$$\vec{y}^0 = -L^{-1}\vec{n}, \quad (3.64)$$

а общее решение однородного уравнения, соответствующего (3.61), может быть представлено в виде ряда Тейлора:

$$\vec{y}(y + \Delta y) = Q(\Delta y)\vec{y}(\vec{y}), \quad (3.65)$$

где трансляционная матрица Q должна быть вычислена только один раз (для выбранного шага интегрирования Δy):

$$Q = I + \frac{\Delta y}{1}L \left(I + \frac{\Delta y}{2}L \left(I + \frac{\Delta y}{3}L \left(I + \frac{\Delta y}{4}L(I + \dots \right. \right. \right. \quad (3.66)$$

Рассмотрим схему у-разбиения материала интегрирования, изображённую на рисунке 3.3.

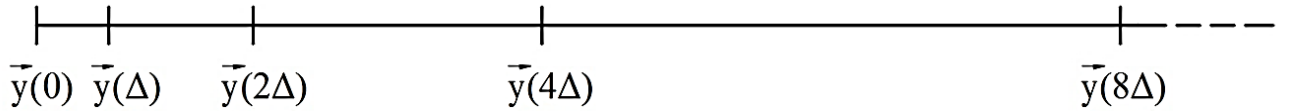


Рисунок 3.3 – Схема у-разбиения материала интегрирования

Из формулы (3.65) следует:

$$\vec{y}(i\Delta) = Q^i \vec{y}(0), \quad (3.67)$$

тогда

$$\begin{aligned} \vec{y}(\Delta) &= Q \vec{y}(0), \\ \vec{y}(2\Delta) &= Q^2 \vec{y}(0), \\ \vec{y}(4\Delta) &= Q^4 \vec{y}(0) = (Q^2)^2 \vec{y}(0), \\ \vec{y}(8\Delta) &= Q^8 \vec{y}(0) = ((Q^2)^2)^2 \vec{y}(0) \end{aligned} \quad (3.68)$$

То есть, в общем случае

$$\vec{y}(2^n \Delta) = (\dots ((Q^2)^2 \dots)^2 \vec{y}(0) \quad (3.69)$$

Формула (3.69) позволяет резко снизить число матричных умножений при переносе начального вектора. Однако, вследствие неизбежного сплющивания начального вектора из-за ограниченной точности вычислений, перенос начального вектора сразу в конечную точку материала интегрирования (чтобы с помощью

(3.52) полностью восстановить начальный вектор, решая соответствующую СЛАУ) невозможен. Для предотвращения сплющивания можно воспользоваться, например, методом ортогонализации по Годунову [158] (процедурой Грама-Шмидта [159]).

После решения СОДУ нам становятся известны векторы $\vec{a}$, $\vec{N}$. Тогда, воспользовавшись (3.58), можно найти вектор $\vec{a}'$. После этого, воспользовавшись (3.45), можем записать выражение для Π в виде:

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{1}{2} \int_y [\vec{a}_u^* (C_1 \mathbf{D}_1 \vec{a}_u + C_2 \mathbf{D}_2 \vec{a}_v) + \vec{a}_v^* (C_7 \mathbf{D}_2 \vec{a}_u + C_7 \mathbf{D}_1 \vec{a}_v) + \\ & + \vec{a}_w^* (C_9 \mathbf{D}_1 \vec{a}_w + C_9 \mathbf{D}_2 \vec{a}_\varphi) + \vec{a}_\varphi^* (C_3 \mathbf{D}_1 \vec{a}_\varphi + C_4 \mathbf{D}_2 \vec{a}_\theta + C_9 \mathbf{D}_2^* \vec{a}_w + C_9 \mathbf{D}_3 \vec{a}_\varphi) + \\ & + \vec{a}_\theta^* (C_8 \mathbf{D}_2 \vec{a}_\varphi + C_8 \mathbf{D}_1 \vec{a}_\theta + C_{10} \mathbf{D}_3 \vec{a}_w + C_{10} \mathbf{D}_3 \vec{a}_\theta) + \vec{a}_u^* (C_7 \mathbf{D}_3 \vec{a}_u + C_7 \mathbf{D}_2^* \vec{a}_v) + \\ & + \vec{a}_v^* (C_5 \mathbf{D}_3 \vec{a}_v + C_2 \mathbf{D}_2^* \vec{a}_u) + \vec{a}_w^* (C_{10} \mathbf{D}_3 \vec{a}_w + C_{10} \mathbf{D}_3 \vec{a}_\theta) + \\ & + \vec{a}_\varphi^* (C_8 \mathbf{D}_3 \vec{a}_\varphi + C_8 \mathbf{D}_2^* \vec{a}_\theta) + \vec{a}_\theta^* (C_6 \mathbf{D}_3 \vec{a}_\theta + C_4 \mathbf{D}_2^* \vec{a}_\varphi)]. \end{aligned} \quad (3.70)$$

Если подставить в это выражение обозначения (3.30) и произвести группировку, то получится:

$$\Pi = \delta_1 x_1 + \delta_2 x_2 + \delta_3 x_3 + \delta_4 G_{xy} + \delta_5 G_{zx} + \delta_6 G_{yz}, \quad (3.71)$$

где обозначено:

$$x_1 = \frac{E_x}{\Delta}, x_2 = \frac{E_y}{\Delta}, x_3 = x_1 v_{yx}, \quad (3.72)$$

а также введены интегралы:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{1}{2} \int_y (h_1 \vec{a}_u^* D_1 \vec{a}_u + h_3 \vec{a}_\varphi^* D_1 \vec{a}_\varphi), \\ \delta_2 &= \frac{1}{2} \int_y (h_1 \vec{a}_v^* D_3 \vec{a}_v + h_3 \vec{a}_\theta^* D_3 \vec{a}_\theta), \\ \delta_3 &= \frac{1}{2} \int_y (h_1 \vec{a}_u^* D_2 \vec{a}_v + h_3 \vec{a}_\varphi^* D_2 \vec{a}_\theta), \\ \delta_4 &= \frac{1}{2} \int_y [h_1 \vec{a}_v^* (2D_2 \vec{a}_u + D_1 \vec{a}_v) + h_3 \vec{a}_\theta^* (2D_2 \vec{a}_\varphi + D_1 \vec{a}_\theta) + \\ & + h_1 \vec{a}_u^* D_3 \vec{a}_u + h_3 \vec{a}_\varphi^* D_3 \vec{a}_\varphi], \end{aligned} \quad (3.73)$$

$$\delta_5 = \frac{kh_1}{2} \int_y (\vec{a}_w^* D_1 \vec{a}_w + 2\vec{a}_w^* D_2 \vec{a}_\varphi + \vec{a}_\varphi^* D_3 \vec{a}_u),$$

$$\delta_6 = \frac{kh_1}{2} \int_y (2\vec{a}_\theta^* D_3 \vec{a}'_w + \vec{a}_\theta^* D_3 \vec{a}_\theta + \vec{a}'_w^* D_3 \vec{a}'_w).$$
(3.73)

Следует отметить, что выражение (3.71) может быть сокращено, если учесть упрощения (3.12)–(3.14).

3.3 Применение разработанной методики для расчёта предложенной конструкции кузова

Если у нас имеются результаты достаточного количества числовых экспериментов (или экспериментальных данных) для нагружений исходной сотовой панели в соответствии со схемой рисунка 3.1, то можно по (3.5) вычислить работу A . Затем, решив полученную СОДУ для векторов $\vec{b}$ по (3.47) и, приравняв работу потенциальной энергии по (3.71), определим значения $x_i (i = \overline{1,3})$ и $G_{ij} (i, j = x, y, z)$, решив соответствующую СЛАУ.

После с учётом (3.72) получаем:

$$v_{yx} = \frac{x_3}{x_1}, \quad v_{xy} = \frac{x_3}{x_2}, \quad E_x = x_1(1 - v_{xy}v_{yx}), \quad E_y = x_2(1 - v_{xy}v_{yx}). \quad (3.74)$$

В том случае, если задача идентификации решалась без учёта упрощающих гипотез (3.12)–(3.14), то число независимых типов нагружений должно быть не меньше шести, а при использовании гипотез – не менее четырех. При этом, под независимым типом нагружения следует понимать нагружения, отличающиеся друг от друга схемами и типами приложения краевых нагрузок по рисунку 3.1, т. к., вследствие линейности рассматриваемой задачи, нагружения, отличающиеся только интенсивностью усилий, являются идентичными.

В случае, если количество типов нагружения превышает необходимый минимум, упругие константы могут быть определены, например, в смысле метода наименьших квадратов. Если ввести вектор упругих констант:

$$\vec{s} = \{x_1, x_2, x_3, G_{xy}, G_{zx}, G_{yz}\}, \quad (3.75)$$

а также вектор интегралов:

$$\vec{\delta} = \{\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6\} \quad (3.76)$$

и потребовать минимума средней квадратичной ошибки для функционала:

$$e^2 = \sum_i (\vec{\delta}_i^* \vec{s} - A_i)^2 = \min, \quad (3.77)$$

то для определения вектора $\vec{s}$ из (3.77) получается СЛАУ:

$$\Delta \vec{s} = \sum_i A_i \vec{\delta}_i, \quad (3.78)$$

где матрица Δ имеет вид

$$\Delta = \sum_i \vec{\delta}_i \vec{\delta}_i^T, \quad (3.79)$$

а суммирование распространяется на все типы нагружения.

Так как коэффициенты δ_i в (3.71) на самом деле являются функциями упругих констант:

$$\delta_i = \delta_i\{x_1, x_2, x_3, G_{xy}, G_{zx}, G_{yz}\}, \quad (3.80)$$

приведенное выше решение является всего лишь одним шагом итерационного алгоритма: вследствие того, что истинный вид функций (3.80) нам неизвестен, то следует поступать, например, так:

1. задаёмся значениями констант;
2. решаем задачу и находим δ_i ;
3. вычисляем новые значения констант;
4. переходим к 2, если не достигнута требуемая точность.

В общем случае алгоритм проведения расчёта вновь разрабатываемого кузова с конструкцией, отличной от традиционной, можно представить в следующем виде (рисунок 3.4)

Решение приведенной задачи (СЛАУ по 3.78) было выполнено в программном комплексе Mathcad (Prime 6.0) в соответствии с рекомендациями встроенного учебника (вкладка «Ресурсы»—«учебник»). Работа внешних краевых усилий определена в программном комплексе SCAD (сведения из протокола расчёта).

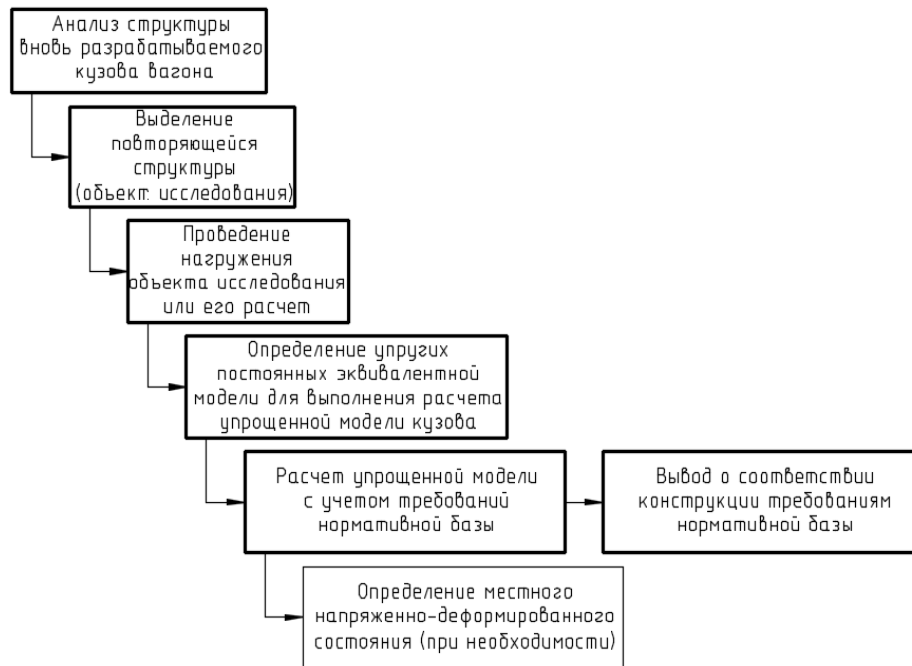


Рисунок 3.4 – Алгоритм проведения расчёта кузова с конструкцией, отличной от традиционной

Далее расчётные модели объекта исследования (подраздел 2.3) и объекта испытаний (подраздел 2.4) были упрощены: в упрощённые модели были введены полученные параметры и проведён расчёт.

В качестве примера на рисунке 3.5 приведено сравнение деформаций, определённых по расчётной схеме с элементами 10×10 мм и упрощенной модели объекта испытаний.

Сопоставление экспериментальных и расчётных (упрощённая модель) данных по главным нормальным напряжениям и деформациям приведено в таблицах 3.1–3.2.

Сравнение результатов расчётов объекта исследования и его упрощённой модели приведено на рисунке 3.6.

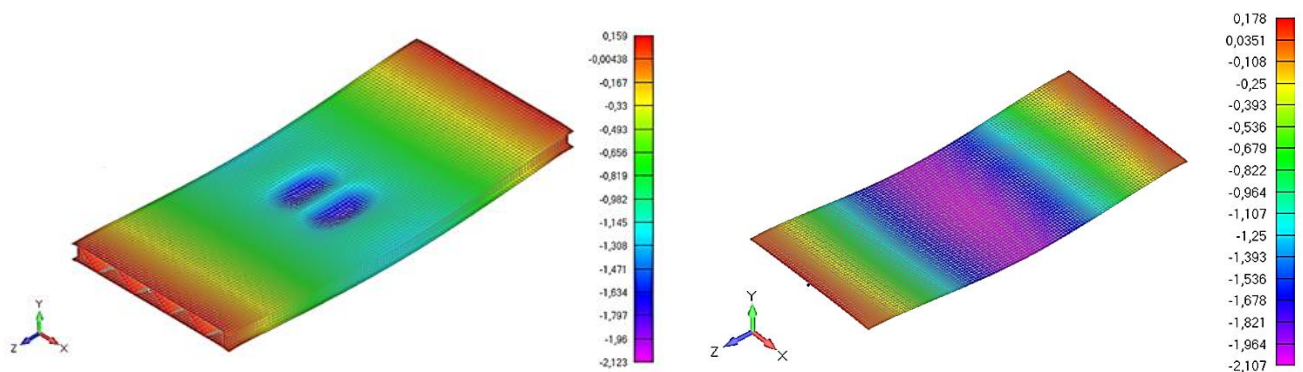


Рисунок 3.5 – Определение деформации объекта испытания (слева) и его упрощённой модели (справа) в вертикальной плоскости

Таблица 3.1 – Сопоставление экспериментальных и расчётных данных (упрощённая модель), нормальные напряжения, МПа

Вариант получения данных	Номер датчика или розетки									
	R'_1	R'_2	R'_4	4'	5'	R_1	R_2	R_4	4	5
Эксперимент	27; 14	22; -4	23; -4	18	19	-28; -13	-22; 4	-21; 7	-18	-19
Расчёт, 10×10 мм	29; 16	21; -4	21; -4	21	21	-32; -17	-21; 4	-22; 5	-21	-20
Расхождение*, %	7	5	9	14	10	13	5	5	14	5
Расчёт, 25×25 мм	31; 16	21; -5	24; -6	22	22	-31; -16	-23; 5	-23; 6	-22	-22
Расхождение, %	13	5	4	18	14	10	4	9	18	14
Расчёт, 50×50 мм	31; 17	25; -8	24; -8	23	23	-31; -17	-25; 7	-24; 8	-23	-23
Расхождение, %	13	12	4	22	17	10	12	13	22	17
Расчёт, 80×80 мм	33; 18	26; -7	25; -9	23	23	-33; -17	-26; 7	-25; 9	-23	-23
Расхождение, %	18	15	8	22	17	15	12	16	22	17
*Расхождение определено для большего по модулю напряжения. Значение округлено до ближайшего целого числа										

Таблица 3.2 – Сопоставление экспериментальных и расчётных данных (упрощённая модель), деформации, мм

Вариант получения данных	Количество элементов в расчётной схеме	Перемещение, мм			
		ДП1	ДП2	ДП3	ДП4
Эксперимент	–	1,33	1,97	1,27	1,83
Расчёт, 10×10 мм	6480	1,53	2,11	1,53	2,06
Расчёт, 25×25 мм	1056	1,67	2,22	1,67	2,16
Расчёт, 50×50 мм	288	1,71	2,28	1,71	2,23
Расчёт, 80×80 мм	150	1,76	2,37	1,76	2,27

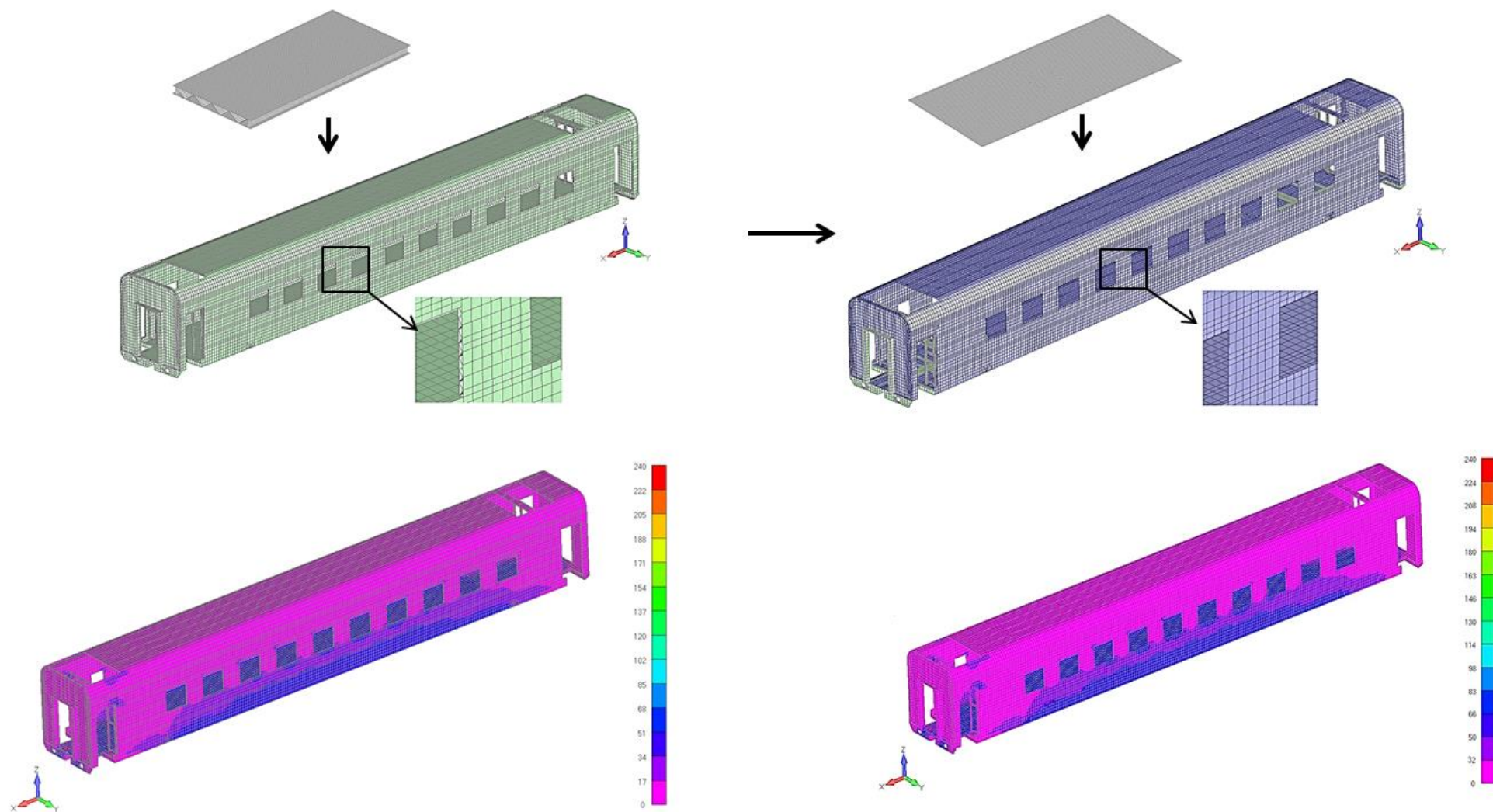


Рисунок 3.6 – Сравнение результатов расчёта объекта исследования (слева) и его упрощённой модели (справа)

Выводы по разделу 3

1 Ввиду наличия экструдированных алюминиевых профилей сложной конфигурации, а также с учётом перспективности применения в многослойных конструкциях композиционных материалов методика их расчёта (учёта в общей структуре кузова вагона) является актуальной задачей.

2 Представлен алгоритм проведения расчёта вновь разрабатываемого кузова с конструкцией, отличной от традиционной (рисунок 3.4).

3 С целью подтверждения возможности использования предложенной методики расчёта (учёта) панелей проведено сопоставление результатов эксперимента с результатами расчёта упрощённой (использованы определённые в соответствии с формулой (3.78) параметры) модели объекта испытаний, а также расчёта объекта исследования с расчётом его по упрощённой модели:

- использование упрощённой расчётной схемы по сравнению с детализированной схемой снижает точность расчёта на 2 %, однако позволяет уменьшить количество элементов расчётной схемы в 3 раза;

- сравнение результатов расчёта объекта исследования с расчётом его по упрощённой модели показывает удовлетворительную сходимость (уровень эквивалентных напряжений в экструдированных панелях отличается не более чем на 14 %).

Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность использования упрощённых моделей кузова вагона с учётом введённых упругих постоянных эквивалентной модели выделенной структуры.

4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Себестоимость пассажирских перевозок во многом определяется безопасностью и комфортабельностью конструкций. Однако, если принять во внимание возрастающую конкуренцию всех других видов транспорта на рынке транспортных услуг, есть прямая необходимость решать проблему повышения комфортабельности современных пассажирских вагонов и создавать конструкции, пригодные для безопасной эксплуатации при высоких скоростях движения [160]. Такими конструкциями, как было доказано во втором разделе настоящей диссертации, могут быть алюминиевые пассажирские вагоны.

Привлекательность разработки такого подвижного состава в настоящее время сводит на нет отсутствие наличия гарантированных заказов на его закупку со стороны компаний, занимающихся пассажирскими перевозками [161], а также необходимость значительных начальных капиталовложений.

Однако, при более подробном рассмотрении вопроса, вагон с кузовом из алюминиевых сплавов может оказаться экономичнее стального вагона традиционной конструкции.

4.1 Расчёт стоимости жизненного цикла пассажирского вагона с алюминиевым кузовом

Для оценки эффективности инновационных мероприятий во многих отраслях экономики, в том числе и на железнодорожном транспорте, в настоящее время широко применяется показатель СЖЦ (Life Cycle Cost) [161].

Выделяют следующие стадии (этапы) жизненного цикла продукции, включающие в себя как единовременные затраты (инвестиции), так и затраты текущего характера (эксплуатационные расходы):

- выработка концепций и определений;
- опытно-конструкторские работы;
- изготовление изделия;

- внедрение технического средства в эксплуатацию с проведением сопутствующих мероприятий (модернизация и дооснащение ремонтной базы, обучение персонала);
- эксплуатация и техническое обслуживание;
- изъятие (ликвидация, утилизация).

Основной целью определения СЖЦ является оценка и/или оптимизация стоимости изделия с учётом срока службы, эксплуатационных затрат (расходов на энергию, обслуживание, ремонт и т. д.) при удовлетворении установленным требованиям к техническим характеристикам, безопасности, надёжности, ремонтнопригодности и др. [162, 163].

Учитывая выше сказанное, СЖЦ для подвижного состава и, в частности, для пассажирского вагона с кузовом из алюминиевых сплавов, определяется по формуле:

$$\text{СЖЦ} = \text{Ц}_{\text{пр}} + \sum_{t=1}^T (\text{И}_t + \text{К}_t \pm \text{Л}_t) \cdot \alpha_t, \quad (4.1)$$

где $\text{Ц}_{\text{пр}}$ – цена приобретения изделия (первоначальная стоимость производителя, без НДС), тыс. руб.;

t – текущий год эксплуатации;

T – конечный год эксплуатации (срок службы¹²);

И_t – годовые эксплуатационные расходы некапитального характера, тыс. руб.;

К_t – сопутствующие единовременные затраты (капитальные вложения), связанные с внедрением изделия в эксплуатацию, тыс. руб.;

Л_t – ликвидационная стоимость объекта, тыс. руб.;

α_t – коэффициент дисконтирования.

Выполним сопоставление СЖЦ одноэтажного серийного вагона локомотивной тяги производства ОАО «ТВЗ» (модель 61-4440) (далее – стальной вагон) и

¹² Далее в расчёте принято, что срок службы вагона со стальным кузовом равен сроку службы вагона с алюминиевым кузовом и составляет 40 лет [36, 164, 165]

вагона с кузовом из алюминиевых сплавов, рассмотренного во втором разделе настоящей диссертации (далее – алюминиевый вагон).

4.2 Исходные данные для расчёта и его выполнение

Показатели, связанные с эксплуатацией вагонов, принятые для последующего сравнительного расчёта приведены в таблицах 4.1–4.3. Некоторые технико-эксплуатационные показатели стального и алюминиевого вагонов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Некоторые технико-эксплуатационные показатели пассажирских вагонов

Наименование показателя	Значение показателя	
	Стальной вагон	Алюминиевый вагон
Масса тары вагона с экипировкой, т	61,1	57,9
Вместимость вагона, человек	36	36
Коэффициент использования вместимости	0,8	0,8
Населенность вагона, человек	28,8*	28,8*
Количество проводников на один вагон, человек	1	1
*С учётом коэффициента использования вместимости		

Показатели, необходимые для расчёта текущих издержек (эксплуатационных расходов) железнодорожного транспорта, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Исходные данные для расчёта эксплуатационных расходов и капитальных вложений для железнодорожного транспорта

Наименование показателя	Условное обозначение	Числовое значение	
		электро-возная тяга	тепловозная тяга
1	2	3	4
Доля электровозной и тепловозной тяги	—	0,814	0,186
Среднесуточный пробег вагона, км	$S_{\text{в}}$	578,1	578,1

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4
Состав пассажирского поезда, вагонов	$m_{\text{п}}$	13,6	13,0
Участковая скорость, км/ч	$V_{\text{уч}}$	61,3	49,3
Масса локомотива, т	$P_{\text{л}}$	139,0	236,0
Масса пассажира с ручным багажом, т	—	0,1	0,1
Коэффициент вспомогательного пробега локомотива	$\beta_{\text{всп}}$	0,084	0,112
Коэффициент вспомогательного линейного пробега локомотивов	$\beta'_{\text{всп}}$	0,054	0,081
Коэффициент вспомогательного линейного пробега локомотивов (без пробега по системе многих единиц) к поездокилометрам	$\beta'_{\text{лин}}$	0,041	0,084
Среднее расстояние оборота пассажирского поезда (в одну сторону), км	$l_{\text{п}}$	1069,6	1069,6
Средняя дальность поездки пассажира, км	$l'_{\text{п}}$	971,0	971,0
Время нахождения локомотивных бригад на станциях их приписки и оборота на 1 км линейного пробега за вычетом пробега по системе многих единиц, ч	$t_{\text{бр}}$	0,017	0,024
Вспомогательное время работы локомотивных бригад, отнесенное на 1 км линейного пробега, ч	$\psi_{\text{всп}}$	0,013	0,016
Затраты маневровых локомотиво-часов на 1000 вагоно-км пассажирских вагонов, ч	$\beta_{\text{м}}$	0,551	0,551
Коэффициент резерва локомотивов	$K_{\text{рл}}$	1,29	1,29
Коэффициент резерва вагона	$K_{\text{рв}}$	1,2	1,2
Расход электроэнергии на 10 тыс. км брутто, кВт·ч	$a_{\text{э}}$	151,6/137,8*	—
Расход условного топлива при тепловозной тяге, кг	$a_{\text{т}}$	—	75,0/68,2*

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4
Соотношение вспомогательной работы проводников, механика, начальника поезда к работе в пути следования	$\gamma_{всп}$	0,0161	0,0105
Коэффициент, учитывающий рабочее время проводников, электромеханика, начальника поезда	γ_p	0,5	0,5
Коэффициент, учитывающий время нахождения вагона в рабочем парке	$K_{вр}$	0,792	0,792
Коэффициент одиночного следования локомотива	$\beta_{один}$	0,123	0,422
Цена магистрального локомотива, тыс. руб.	$\text{Ц}_{\text{лок. маг}}$	55000,0	42000,0
Цена маневрового локомотива, тыс. руб.	$\text{Ц}_{\text{лок. ман}}$	25000,0	25000,0
*В числителе – для стального вагона, в знаменателе – для алюминиевого			

В таблице 4.3 приведены нормативы текущих расходов на измерители.

Таблица 4.3 – Нормативы текущих расходов на измерители

Наименование измерителя	Стоимостные нормативы, тыс. руб.	
	Локомотивная тяга	Тепловозная тяга
1	2	3
Вагоно-километр	0,26	0,26
Вагоно-час, стальной вагон	133,87	133,87
Вагоно-час, алюминиевый вагон	119,06	119,06
Отправленный пассажир	10,41	10,41
Отправленный пассажирский вагон	1047,33	1047,33
Локомотиво-километр с учетом вспомогательного пробега локомотива	19,66	31,86
Локомотиво-километр во главе поезда и одиночном следовании	7,45	15,5

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3
Локомотиво-час поездного локомотива,	477,26	557,06
Бригадо-час локомотивных бригад	902,58	987,18
Человеко-час начальника поезда	236,13	236,13
Человеко-час проводника	172,18	172,18
Человеко-час электромеханика	197,06	197,06
Тонно-километр брутто вагонов и локомотивов	0,01332	0,01332
Киловатт-час электроэнергии	2,86	24,16
Локомотиво-час маневровой работы, в том числе реновация	1785,66, 16,99	1785,66, 16,99

Общий подход к расчёту СЖЦ приведен в методике определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта [166].

Предполагается, что алюминиевый вагон, как и стальной, будет эксплуатироваться в составе поездов на электрифицированных и неэлектрифицированных участках железных дорог. Показатели «расход электроэнергии на 10 тыс. км брутто» и «кг условного топлива» для алюминиевого вагона снижены относительно среднесетевых значений для стального вагона на 10% [167].

Нормативы текущих расходов на измерители эксплуатационной работы в пассажирском движении приведены в таблице 4.3. Расходная ставка «вагоно-час» рассчитана непосредственно для каждого типа вагона с учётом его цены и данных о стоимости ремонтов по их видам за срок службы.

Формула для расчёта расходной ставки «вагоно-час» имеет следующий вид:

$$e_{вч} = \frac{(\Pi_{др} \cdot n_{др} + \Pi_{кр-1} \cdot n_{кр-1} + \Pi_{кр-2} \cdot n_{кр-2}) \cdot 10^3}{T_{сл} \cdot 365 \cdot 24 \cdot K_{вр}}, \quad (4.2)$$

где $\Pi_{др}, \Pi_{кр-1}, \Pi_{кр-2}$ – цена деповского ремонта, капитального ремонта первого объёма, капитального ремонта второго объёма соответственно, тыс. руб.;

$n_{др}, n_{кр-1}, n_{кр-2}$ – количество ремонтов соответствующего вида и объёма за срок

службы вагона;

$T_{\text{сл}}$ – срок службы вагона;

$K_{\text{вр}}$ – коэффициент нахождения вагона в рабочем парке.

Порядок проведения технического обслуживания и ремонтов, а также сроков их проведения определены [168].

В соответствии с указанным нормативным документом определён следующий регламент проведения ремонтных работ:

- деповской ремонт (ДР) – проводится первый раз через три года после постройки, капитального ремонта второго объёма (КР-2) или капитально-восстановительного ремонта (КВР), затем ежегодно;

- капитальный ремонт первого объёма (КР-1) – проводится первый раз через восемь лет после постройки, проведения КР-2 или КВР, затем каждые шесть лет в течение срока службы вагона;

- капитальный ремонт второго объёма или капитально-восстановительный ремонт проводится через 20 лет после постройки (с учётом срока службы кузова вагона в расчёте принято, что за время эксплуатации будет выполнен только КР-2).

Цена различных видов ремонтов принята на основе ориентировочных данных ОАО «Вагонреммаш».

Дополнительно в сравнительном расчёте приняты следующие допущения:

- стоимость ДР в соответствии с технологией его выполнения для стального и алюминиевого вагонов принята одинаковой;

- затраты на ремонты КР-1 и КР-2 для алюминиевого вагона снижены на 18% по сравнению со стальным вагоном.

На основе указанных данных, а также с учётом количества ремонтов по их видам за срок службы величина расходной ставки для стального вагона составит (формула (4.2)):

$$e_{\text{вч}} = \frac{(350 \cdot 29 + 2500 \cdot 5 + 14500 \cdot 1) \cdot 10^3}{40 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 0,792} = 133,87 \cdot 10^3 \text{ руб.}$$

Для алюминиевого вагона:

$$e_{\text{вч}} = \frac{(350 \cdot 29 + 2120,5 \cdot 5 + 12290 \cdot 1) \cdot 10^3}{40 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 0,792} = 119,06 \cdot 10^3 \text{ руб.}$$

Годовая производительность вагона в пассажиро-километрах рассчитана по формуле:

$$\sum Pl_{\pi} = 365 \cdot P_{\pi} \cdot S_{\text{в}} \cdot K_{\text{вр}}, \quad (4.3)$$

где P_{π} – населённость пассажирского вагона с учётом коэффициента использования вместимости, человек;

$S_{\text{в}}$ – среднесуточный пробег вагона, км;

$K_{\text{вр}}$ – коэффициент, учитывающий время нахождения вагона в рабочем парке.

Подставляя приведенные ранее значения используемых показателей в формулу (4.3) получим:

$$\sum Pl_{\pi} = 365 \cdot 28,8 \cdot 578,1 \cdot 0,792 = 4812974 \text{ (пассажиро-километров)}$$

Полученное значение будет одинаковым для стального и алюминиевого вагонов.

Расчёт годовых эксплуатационных расходов для стального вагона приведен в таблице 4.4, для алюминиевого – в таблице 4.5.

Доля зависящих расходов при электровозной тяге составляет 56,3 %, при тепловозной – 61,5%. Тогда общие эксплуатационные расходы за вычетом затрат на реновацию для стального вагона составят:

- при электровозной тяге:

$$3_t = 2634,51 : 56,3 \cdot 100 = 4679,41 \text{ тыс. руб.},$$

- при тепловозной тяге:

$$3_t = 980,9 : 61,5 \cdot 100 = 1594,96 \text{ тыс. руб.}$$

Значит, сумма годовых эксплуатационных расходов будет равна:

$$\sum 3_t = 4679,41 + 1594,96 = 6274,37 \text{ тыс. руб.}$$

Тогда за жизненный цикл стального вагона сумма годовых эксплуатационных расходов составит:

$$C_{\text{эсп.}} = 6274,37 \cdot 40 = 250974,8 \text{ тыс. руб}$$

Таблица 4.4 – Расчёт годовых эксплуатационных расходов потребителя при эксплуатации стального вагона

Наименование измерителя	Стоимостные нормативы на измеритель		Формула для расчета	Расчет затрат измерителя	Сумма, тыс. руб.
	Условное обозначение	Величина, тыс. руб.			
1	2	3	4	5	6
1 Вагоно-километры	$e_{\text{ВКМ}}$	0,26	$\sum nS = \frac{\sum Pl}{P_n}$	$\sum nS = \frac{4812974}{28,8} = 167117,$	35,37
- электровозная тяга				$0,814 \cdot 167117 = 136033$	
- тепловозная тяга				$0,186 \cdot 167117 = 31084$	8,08
2 Вагоно-часы, в том числе реновация	$e_{\text{ВЧ}}$	133,87	$\sum nt = \frac{24 \cdot \sum nS}{S_{\text{В}}}$	$\sum nt = \frac{24 \cdot 167117}{578,1} = 6938,$	757,0
- электровозная тяга				$0,814 \cdot 6938 = 5648$	
- тепловозная тяга				$0,186 \cdot 6938 = 1290$	
3 Локомотиво-километры во главе поездов (поездо-км)	—		$\sum NS = \frac{\sum nS}{m_{\text{п}}}$	$\sum NS = \frac{136033}{13,6} = 10002$	
- электровозная тяга				$\sum NS = \frac{31084}{13,0} = 2391$	
- тепловозная тяга					

Продолжение таблицы 4.4

1	2	3	4	5	6
4 Локомотиво-километры с учётом вспомогательного пробега локомотивов - электровозная тяга	$e_{\text{лкм}}$	19,66	$\sum MS = \sum NS \times (1 + \beta_{\text{всп}})$	$\sum MS = 10002 \cdot (1 + 0,084) = 10842$	213,15
- тепловозная тяга		31,86		$\sum MS = 2391 \cdot (1 + 0,112) = 2659$	84,72
5 Локомотиво-часы поездных локомотивов, - электровозная тяга (в том числе реновация)	$e_{\text{лч}}$	477,26 (477,26)	$\sum Mt = \sum MS \times (1 + \beta'_{\text{всп}}) \times (\frac{1}{V_{\text{уч}}} + t_{\text{бр}})$	$\sum Mt = 10842 \cdot (1 + 0,054) \times (1/61,3 + 0,017) = 381$	181,84 (181,84)
- тепловозная тяга (в том числе реновация)		557,06 (557,06)		$\sum Mt = 2659 \cdot (1 + 0,081) \times (1/49,3 + 0,024) = 118$	65,73 (65,73)
6 Локомотиво-километры во главе поездов и одиночном следовании - электровозная тяга	$e_{\text{лкм}}$	7,45	$\sum MS_{\text{го}} = \sum NS \times (1 + \beta_{\text{один}})$	$\sum MS_{\text{го}} = 10002 \cdot (1 + 0,123) = 11232$	83,68
- тепловозная тяга		15,5		$\sum MS_{\text{го}} = 2391 \cdot (1 + 0,422) = 3400$	52,7

Продолжение таблицы 4.4

1	2	3	4	5	6
7 Тонно-километры брутто вагонов - электровозная тяга	$e_{\text{ТКМ}}^{\text{В}}$	0,01332	$\sum Pl_{\text{бп}}^{\text{В}} = \sum nS \times$ $\times (q_{\text{т}} + 0,1 \cdot P_n)$	$\sum Pl_{\text{бп}}^{\text{В}} = 136033 \cdot (61,1 + 0,1 \cdot 28,8) =$ $= 8703391$	115,93
- тепловозная тяга				$\sum Pl_{\text{бп}}^{\text{В}} = 31084 \cdot (61,1 + 0,1 \cdot 28,8) =$ $= 1988754$	26,49
8 Тонно-километры брутто локомотивов - электровозная тяга	$e_{\text{ТКМ}}^{\text{Л}}$	0,01332	$\sum Pl_{\text{бп}}^{\text{Л}} = P_{\text{л}} \cdot \sum NS \times$ $\times (1 + \beta'_{\text{лин}})$	$\sum Pl_{\text{бп}}^{\text{Л}} = 139 \cdot 10002 \cdot (1 + 0,041) =$ $= 1447279$	19,28
- тепловозная тяга				$\sum Pl_{\text{бп}}^{\text{Л}} = 236 \cdot 2391 \cdot (1 + 0,084) =$ $= 611675$	8,15
9 Бригадо-часы локо- мотивных бригад - электровозная тяга	$e_{\text{брч}}$	902,58	$\sum Бt_{\text{л}} = \sum NS \times$ $\times (1 + \beta'_{\text{лин}}) \times$ $\times (1/V_{\text{уч}} + \psi_{\text{всп}})$	$\sum Бt_{\text{л}} = 10002 \cdot (1 + 0,041) \times$ $\times (1/61,3 + 0,013) = 305$	275,29
- тепловозная тяга		987,18		$\sum Бt_{\text{л}} = 2391 \cdot (1 + 0,084) \times$ $\times (1/49,3 + 0,016) = 94$	92,79

Продолжение таблицы 4.4

1	2	3	4	5	6
10 Человеко-часы проводников - электровозная тяга	$e_{\text{чпр}}$	172,18	$\sum \text{ч}t_{\text{пр}} = \gamma_{\text{р}} \cdot \sum nS \times$ $\times (1/V_{\text{уч}} + \gamma_{\text{всп}}^{\text{пр}})$	$\sum \text{ч}t_{\text{пр}} = 0,5 \cdot 136033 \cdot (1/61,3 + 0,0161) =$ $= 2205$	379,66
- тепловозная тяга				$\sum \text{ч}t_{\text{пр}} = 0,5 \cdot 33556 \cdot (1/49,3 + 0,0105) =$ $= 516$	88,84
11 Человеко-часы электромеханика - электровозная тяга	$e_{\text{чм}}$	197,06	$\sum \text{ч}t_{\text{м}} = \gamma_{\text{р}} \cdot \sum NS \times$ $\times (1/V_{\text{уч}} + \gamma_{\text{всп}}^{\text{мех}})$	$\sum \text{ч}t_{\text{м}} = 0,5 \cdot 10002 \cdot (1/61,3 + 0,0161) =$ $= 162$	31,92
- тепловозная тяга				$\sum \text{ч}t_{\text{м}} = 0,5 \cdot 2391 \cdot (1/49,3 + 0,0105) =$ $= 37$	7,29
12 Человеко-часы начальника поезда - электровозная тяга	$e_{\text{чн}}$	236,13	$\sum \text{ч}t_{\text{нач}} = \gamma_{\text{р}} \cdot \sum NS \times$ $\times (1/V_{\text{уч}} + \gamma_{\text{всп}}^{\text{нач}})$	$\sum \text{ч}t_{\text{нач}} = 0,5 \cdot 10002 \cdot (1/61,3 + 0,0161) =$ $= 162$	38,25
- тепловозная тяга				$\sum \text{ч}t_{\text{нач}} = 0,5 \cdot 2391 \cdot (1/49,3 + 0,0105) =$ $= 37$	8,74

Продолжение таблицы 4.4

1	2	3	4	5	6
13 Локомотиво- часы маневровой ра- боты, (в том числе ренова- ция) - электровозная тяга	e_m	1785,66 (17,0)	$\sum Mt_m = \frac{\sum nS}{1000} \cdot \beta_{ман}$	$\sum Mt_m = \frac{167117}{1000} \cdot 0,551 = 92,$ $0,814 \cdot 92 = 75$	133,92 (1,28)
- тепловозная тяга				$0,186 \cdot 92 = 17$	30,36 (0,29)
14 Киловатт-часы электроэнергии	$e_э$	2,86	$\sum A = a_э \cdot \sum Pl_{6p}^B \cdot 10^{-4}$	$\sum A = 151,6 \cdot 8703391 \cdot 10^{-4} = 131943$	377,36
кг условного топ- лива	e_T	24,16	$\sum A = a_T \cdot \sum Pl_{6p}^B \cdot 10^{-4}$	$\sum A = 75 \cdot 1988754 \cdot 10^{-4} = 14916$	360,37
15 Отправленные пассажиры - электровозная тяга	$e_{оп}$	10,41	$\sum P = \frac{\sum Pl_n}{l'_n}$	$\sum P = \frac{4812974}{971} = 4957,$ $0,814 \cdot 4957 = 4035$	42,0
- тепловозная тяга				$0,186 \cdot 4957 = 922$	9,6

Продолжение таблицы 4.4

1	2	3	4	5	6
16 Отправленные вагоны	$e_{ов}$	1047,33	$\sum n = \frac{\sum nS}{l_n}$	$\sum n = \frac{167117}{1069,6} = 156,$	
- электровозная тяга				$0,814 \cdot 156 = 127$	133,01
- тепловозная тяга				$0,186 \cdot 156 = 29$	30,37
Итого					3864,58
- электровозная тяга					2817,66
- тепловозная тяга					1046,92
в том числе реновация					249,14
- электровозная тяга					183,12
- тепловозная тяга					66,02
без учета реновации:					3615,4
- электровозная тяга					2634,51
- тепловозная тяга					980,9

Таблица 4.5 – Расчёт годовых эксплуатационных расходов потребителя при эксплуатации алюминиевого вагона

Наименование измерителя	Стоимостные нормативы на измеритель		Формула для расчета	Расчет затрат измерителя	Сумма, тыс. руб.
	Условное обозначение	Величина, тыс. руб.			
1	2	3	4	5	6
1 Вагоно-километры	$e_{\text{ВКМ}}$	0,26	$\sum nS = \frac{\sum Pl}{P_n}$	$\sum nS = \frac{4812974}{28,8} = 167117,$	35,37
- электровозная тяга				$0,814 \cdot 167117 = 136033$	
- тепловозная тяга				$0,186 \cdot 167117 = 31084$	8,08
2 Вагоно-часы, в том числе реновация	$e_{\text{ВЧ}}$	119,06	$\sum nt = \frac{24 \cdot \sum nS}{S_{\text{в}}}$	$\sum nt = \frac{24 \cdot 167117}{578,1} = 6938,$	672,45
- электровозная тяга				$0,814 \cdot 6938 = 5648$	
- тепловозная тяга				$0,186 \cdot 6938 = 1290$	153,59
3 Локомотиво-километры во главе поездов (поездо-км)	—		$\sum NS = \frac{\sum nS}{m_{\text{п}}}$	$\sum NS = \frac{136033}{13,6} = 10002$	
- электровозная тяга				$\sum NS = \frac{31084}{13,0} = 2391$	
- тепловозная тяга					

Продолжение таблицы 4.5

1	2	3	4	5	6
4 Локомотиво-километры с учётом вспомогательного пробега локомотивов - электровозная тяга	$e_{\text{лкм}}$	19,66	$\sum MS = \sum NS \times (1 + \beta_{\text{всп}})$	$\sum MS = 10002 \cdot (1 + 0,084) = 10842$	213,15
- тепловозная тяга		31,86		$\sum MS = 2391 \cdot (1 + 0,112) = 2659$	84,72
5 Локомотиво-часы поездных локомотивов, - электровозная тяга (в том числе реновация)	$e_{\text{лч}}$	477,26 (477,26)	$\sum Mt = \sum MS \times (1 + \beta'_{\text{всп}}) \times (\frac{1}{V_{\text{уч}}} + t_{\text{бр}})$	$\sum Mt = 10842 \cdot (1 + 0,054) \times (1/61,3 + 0,017) = 381$	181,84 (181,84)
- тепловозная тяга (в том числе реновация)		557,06 (557,06)		$\sum Mt = 2659 \cdot (1 + 0,081) \times (1/49,3 + 0,024) = 118$	65,73 (65,73)
6 Локомотиво-километры во главе поездов и одиночном следовании - электровозная тяга	$e_{\text{лкм}}$	7,45	$\sum MS_{\text{го}} = \sum NS \times (1 + \beta_{\text{один}})$	$\sum MS_{\text{го}} = 10002 \cdot (1 + 0,123) = 11232$	83,68
- тепловозная тяга		15,5		$\sum MS_{\text{го}} = 2391 \cdot (1 + 0,422) = 3400$	52,7

Продолжение таблицы 4.5

1	2	3	4	5	6
7 Тонно-километры брутто вагонов - электровозная тяга	$e_{\text{ТКМ}}^{\text{в}}$	0,01332	$\sum Pl_{\text{бп}}^{\text{в}} = \sum nS \times$ $\times (q_{\text{т}} + 0,1 \cdot P_{\text{н}})$	$\sum Pl_{\text{бп}}^{\text{в}} = 136033 \cdot (57,9 + 0,1 \cdot 28,8) =$ $= 8703391$	110,13
- тепловозная тяга				$\sum Pl_{\text{бп}}^{\text{в}} = 31084 \cdot (57,9 + 0,1 \cdot 28,8) =$ $= 1988754$	25,17
8 Тонно-километры брутто локомотивов - электровозная тяга	$e_{\text{ТКМ}}^{\text{л}}$	0,01332	$\sum Pl_{\text{бп}}^{\text{л}} = P_{\text{л}} \cdot \sum NS \times$ $\times (1 + \beta'_{\text{лин}})$	$\sum Pl_{\text{бп}}^{\text{л}} = 139 \cdot 10002 \cdot (1 + 0,041) =$ $= 1447279$	19,28
- тепловозная тяга				$\sum Pl_{\text{бп}}^{\text{л}} = 236 \cdot 2391 \cdot (1 + 0,084) =$ $= 611675$	8,15
9 Бригадо-часы локо- мотивных бригад - электровозная тяга	$e_{\text{брч}}$	902,58	$\sum Bt_{\text{л}} = \sum NS \times$ $\times (1 + \beta'_{\text{лин}}) \times$ $\times (1/V_{\text{уч}} + \psi_{\text{всп}})$	$\sum Bt_{\text{л}} = 10002 \cdot (1 + 0,041) \times$ $\times (1/61,3 + 0,013) = 305$	275,29
- тепловозная тяга		987,18		$\sum Bt_{\text{л}} = 2391 \cdot (1 + 0,084) \times$ $\times (1/49,3 + 0,016) = 94$	92,79

Продолжение таблицы 4.5

1	2	3	4	5	6
10 Человеко-часы проводников - электровозная тяга	$e_{\text{чпр}}$	172,18	$\sum \text{ч}t_{\text{пр}} = \gamma_p \cdot \sum nS \times$ $\times (1/V_{\text{уч}} + \gamma_{\text{всп}}^{\text{пр}})$	$\sum \text{ч}t_{\text{пр}} = 0,5 \cdot 136033 \cdot (1/61,3 + 0,0161) =$ $= 2205$	379,66
- тепловозная тяга				$\sum \text{ч}t_{\text{пр}} = 0,5 \cdot 33556 \cdot (1/49,3 + 0,0105) =$ $= 516$	88,84
11 Человеко-часы электромеханика - электровозная тяга	$e_{\text{чм}}$	197,06	$\sum \text{ч}t_{\text{м}} = \gamma_p \cdot \sum NS \times$ $\times (1/V_{\text{уч}} + \gamma_{\text{всп}}^{\text{мех}})$	$\sum \text{ч}t_{\text{м}} = 0,5 \cdot 10002 \cdot (1/61,3 + 0,0161) =$ $= 162$	31,92
- тепловозная тяга				$\sum \text{ч}t_{\text{м}} = 0,5 \cdot 2391 \cdot (1/49,3 + 0,0105) =$ $= 37$	7,29
12 Человеко-часы начальника поезда - электровозная тяга	$e_{\text{чн}}$	236,13	$\sum \text{ч}t_{\text{нач}} = \gamma_p \cdot \sum NS \times$ $\times (1/V_{\text{уч}} + \gamma_{\text{всп}}^{\text{нач}})$	$\sum \text{ч}t_{\text{нач}} = 0,5 \cdot 10002 \cdot (1/61,3 + 0,0161) =$ $= 162$	38,25
- тепловозная тяга				$\sum \text{ч}t_{\text{нач}} = 0,5 \cdot 2391 \cdot (1/49,3 + 0,0105) =$ $= 37$	8,74

Продолжение таблицы 4.5

1	2	3	4	5	6
13 Локомотиво- часы маневровой ра- боты, (в том числе ренова- ция) - электровозная тяга	e_m	1785,66 (17,0)	$\sum Mt_m = \frac{\sum nS}{1000} \cdot \beta_{\text{ман}}$	$\sum Mt_m = \frac{167117}{1000} \cdot 0,551 = 92$	133,92 (1,28)
- тепловозная тяга				$0,814 \cdot 92 = 75$	
14 Киловатт-часы электроэнергии	$e_э$	2,86	$\sum A = a_э \cdot \sum Pl_{\text{бр}}^B \cdot 10^{-4}$	$\sum A = 137,82 \cdot 8268086 \cdot 10^{-4} = 113951$	325,9
кг условного топ- лива	e_t	24,16	$\sum A = a_t \cdot \sum Pl_{\text{бр}}^B \cdot 10^{-4}$	$\sum A = 68,2 \cdot 1889286 \cdot 10^{-4} = 12885$	311,3
15 Отправленные пассажиры - электровозная тяга	$e_{\text{оп}}$	10,41	$\sum P = \frac{\sum Pl_n}{l'_n}$	$\sum P = \frac{4812974}{971} = 4957,$	42,0
- тепловозная тяга				$0,814 \cdot 4957 = 4035$	
				$0,186 \cdot 4957 = 922$	9,6

Продолжение таблицы 4.5

1	2	3	4	5	6
16 Отправленные вагоны	$e_{\text{ов}}$	1047,33	$\sum n = \frac{\sum nS}{l_n}$	$\sum n = \frac{167117}{1069,6} = 156,$	133,01
- электровозная тяга				$0,814 \cdot 156 = 127$	
- тепловозная тяга				$0,186 \cdot 156 = 29$	
Итого					3653,28
- электровозная тяга					2675,85
- тепловозная тяга					977,43
в том числе реновация					249,14
- электровозная тяга					183,12
- тепловозная тяга					66,02
без учета реновации:					3404,14
- электровозная тяга					2492,73
- тепловозная тяга					911,41

Для алюминиевого вагона общие эксплуатационные расходы за вычетом затрат на реновацию составят:

- при электровозной тяге:

$$З_t = 2492,73 : 56,3 \cdot 100 = 4427,58 \text{ тыс. руб.},$$

- при тепловозной тяге:

$$З_t = 911,41 : 61,5 \cdot 100 = 1481,97 \text{ тыс. руб.}$$

Значит, сумма годовых эксплуатационных расходов будет равна:

$$\sum З_t = 4427,58 + 1481,97 = 5909,55 \text{ тыс. руб.}$$

Тогда за жизненный цикл алюминиевого вагона сумма годовых эксплуатационных расходов составит:

$$C_{\text{эсп.}} = 5909,55 \cdot 40 = 236382 \text{ тыс. руб.}$$

В расчёте СЖЦ учтены затраты на выполнение различных видов ремонтов за срок службы вагонов в соответствии с порядком их проведения, указанным выше.

Общая стоимость ремонтов за 40 лет составит:

- для стального вагона:

$$C_{\text{рем.}} = 350 \cdot 29 + 2500 \cdot 5 + 14500 = 37150 \text{ тыс. руб.},$$

где 350 – цена деповского ремонта, тыс. руб.;

2500 – цена КР-1, тыс. руб.;

14500 – цена КР-2, тыс. руб.;

- для алюминиевого вагона:

$$C_{\text{рем.}} = 350 \cdot 29 + 2120 \cdot 5 + 12290 = 33040 \text{ тыс. руб.},$$

где 350 – цена деповского ремонта, тыс. руб.;

2120 – цена КР-1, тыс. руб.;

12290 – цена КР-2, тыс. руб.;

Расчёт дополнительных единовременных капитальных вложений приведён в таблицах 4.6–4.7. К ним относятся затраты в парк поездных и маневровых локомотивов в доле, приходящейся на один вагон, затраты на развитие ремонтной базы вагонов и локомотивов.

Затраты в развитие ремонтных баз приняты в размере 10% от затрат в парк локомотивов и 7% от затрат в парк вагонов с учётом коэффициента резерва вагона $K_{рв} = 1,2$. Для алюминиевого вагона учтены инвестиции на приобретение оборудования для проведения СТП.

Общая сумма капитальных вложений при производстве стального вагона составит $C_{\text{кап}} = 7425,71$ тыс. руб., алюминиевого вагона – $C_{\text{кап}} = 8630,35$ тыс. руб.

Ликвидационная стоимость пассажирского вагона определяется на конечном этапе его эксплуатации. В неё входят расходы на вывод из эксплуатации и утилизацию:

- средства, получаемые от вторичного использования запасных частей и металлолома;
- затраты, связанные с демонтажом оборудования, не подлежащих ремонту узлов и деталей;
- расходы по транспортировке;
- иные дополнительные затраты.

Расходы на утилизацию определены с учётом стоимости металлолома и массы применяемых марок стали в конструкции вагонов.

В конструкции рамы стального (масса – 5200 кг) применены стали 09Г2С, 09Г2СД. Масса применяемых коррозионностойких марок стали в кузове вагона – 7150 кг.

Тогда ориентировочные расходы на утилизацию стального вагона составят:

$$C_{\text{ут.}} = -470 + (5,2 \cdot 12,5 + 7,15 \cdot 60) = -24 \text{ тыс. руб.},$$

где минус 470 – расходы по разборке вагона, тыс. руб.

12,5 – цена 1 т металлолома стали марок 09Г2С, 09Г2СД, тыс. руб.

60 – цена 1 т металлолома коррозионностойких марок стали, применённых в конструкции, тыс. руб.

Таблица 4.6 – Расчёт капитальных вложений железных дорог при эксплуатации стального вагона

Наименование показателя	Формула для расчёта показателя	Расчет затрат измерителя на один вагон рабочего парка	Стоимость технических средств, тыс. руб.	Сумма расходов, тыс. руб.
Парк магистральных локомотивов	$M_M = \frac{M_t \cdot K_{лр}}{24 \cdot 365}$	$M_M = \frac{381 \cdot 1,29}{24 \cdot 365} = 0,05611$	55000	3086,05
- электровозная тяга				
- тепловозная тяга		$M_M = \frac{118 \cdot 1,29}{24 \cdot 365} = 0,01738$	42000	729,36
Локомотиворемонтная база	$K_{мл}^p = M_M \cdot K_{лб}$	$K_{мл}^p = 0,05611 \cdot 0,1 = 0,005611$	55000	308,61
- электровозная тяга				
- тепловозная тяга		$K_{мл}^p = 0,01738 \cdot 0,1 = 0,001738$	42000	72,94
Парк маневровых локомотивов	$M = \frac{\sum M t_m}{24 \cdot 365}$	$M = \frac{92}{24 \cdot 365} = 0,0105$	25000	262,5
Локомотиворемонтная база маневровых локомотивов	$K_{ман}^p = M \cdot K_{лб}$	$K_{ман}^p = 0,0105 \cdot 0,1 = 0,00105$	25000	26,25
Вагоноремонтная база	$K_v = пв \cdot K_{вб}$	$K_v = 1,2 \cdot 0,07 = 0,084$	35000	2940
Итого				7425,71

Таблица 4.7 – Расчёт капитальных вложений железных дорог при эксплуатации алюминиевого вагона

Наименование показателя	Формула для расчёта показателя	Расчет затрат измерителя на один вагон рабочего парка	Стоимость технических средств, тыс. руб.	Сумма расходов, тыс. руб.
Парк магистральных локомотивов	$M_M = \frac{M_t \cdot K_{лр}}{24 \cdot 365}$	$M_M = \frac{381 \cdot 1,29}{24 \cdot 365} = 0,05611$	55000	3086,05
- электровозная тяга				
- тепловозная тяга		$M_M = \frac{118 \cdot 1,29}{24 \cdot 365} = 0,01738$	42000	729,36
Локомотиворемонтная база	$K_{мл}^p = M_M \cdot K_{лб}$	$K_{мл}^p = 0,05611 \cdot 0,1 = 0,005611$	55000	308,61
- электровозная тяга				
- тепловозная тяга		$K_{мл}^p = 0,01738 \cdot 0,1 = 0,001738$	42000	72,94
Парк маневровых локомотивов	$M = \frac{\sum M t_m}{24 \cdot 365}$	$M = \frac{92}{24 \cdot 365} = 0,0105$	25000	262,5
Локомотиворемонтная база маневровых локомотивов	$K_{ман}^p = M \cdot K_{лб}$	$K_{ман}^p = 0,0105 \cdot 0,1 = 0,00105$	25000	26,25
Вагоноремонтная база	$K_v = пв \cdot K_{вб}$	$K_v = 1,2 \cdot 0,07 = 0,084$	34460	2894,64
Единовременные затраты на приобретение оборудования	$З = Ц/N$	N=200	250000	1250
Итого				8630,35

Ориентировочные расходы на утилизацию алюминиевого вагона составят:

$$C_{\text{ут.}} = -470 + (9,8 \cdot 70) = 216 \text{ тыс. руб.},$$

где минус 470 – расходы по разборке вагона, тыс. руб.

9,8 – масса кузова алюминиевого вагона, т.

70 – цена 1 т металлолома алюминия, тыс. руб.

В соответствии с формулой (4.1) СЖЦ составит:

- для стального вагона:

$$\text{СЖЦ} = 35000 + (250974,8 + 37150 + 7425,71 + 24) = 330574,51 \text{ тыс. руб.}$$

- для алюминиевого вагона:

$$\text{СЖЦ} = 34460 + (236382 + 33040 + 8630,35 - 216) = 312296,35 \text{ тыс. руб.}$$

Таким образом, экономия жизненного цикла алюминиевого пассажирского вагона по сравнению со стальным вагоном при эксплуатации составит:

$$\Delta \text{СЖЦ} = 330574,51 - 312296,35 = 18278,16 \text{ тыс. руб.}$$

Выводы по разделу 4

Полученное значение экономии жизненного цикла подтверждает многолетний опыт эксплуатации алюминиевых пассажирских вагонов за рубежом (Германия, Франция, Япония, Испания и т. д.), а также возможность создания экономичных, долговечных конструкций из алюминиевых сплавов, отвечающих всем современным требованиям эксплуатации и обеспечивающих снижение затрат в течение всего жизненного цикла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 На основании анализа зарубежного и отечественного опыта проектирования, изготовления пассажирских вагонов с кузовами из алюминиевых сплавов предложен вариант конструкции кузова пассажирского вагона с поперечным сечением и торцевыми частями, сформированными из экструдированных алюминиевых профилей (панелей).

2 Определена необходимость дополнения существующей нормативной базы для проведения проектных работ требованиями к элементам обшивки крыши и боковых стен кузова вагона с конструкцией, отличной от традиционной.

3 Приведен подход, позволяющий на этапе проектирования проверить соответствие кузова пассажирского вагона с конструкцией, отличной от традиционной, требованиям безопасности, указанным в нормативной документации, и сформулированы требования к элементам обшивки крыши и боковых стен кузова вагона с поперечным сечением, выполненным из экструдированных алюминиевых панелей.

4 Разработана конечноэлементная модель алюминиевого кузова, проведены расчёты по I и III расчётным режимам, подтвердившие соответствие предлагаемого варианта конструкции требованиям прочности.

5 Для проверки выполненной модели и определения размеров конечных элементов, обеспечивающих необходимую точность вычислений при минимальной затрате времени на расчёт, проведено экспериментальное исследование экструдированной панели, предлагаемой для формирования поперечного сечения кузова вагона.

6 Разработана методика расчёта экструдированных алюминиевых профилей, позволяющая значительно упростить начальные стадии разработки конструкции кузова.

7 Выполнен сравнительный расчёт СЖЦ алюминиевого и стального вагонов, результаты которого подтверждают возможность создания экономичной конструкции с использованием алюминиевых сплавов.

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, могут быть использованы для разработки конструкторских решений при проектировании кузовов пассажирских вагонов с конструкцией, отличной от традиционной, из различных конструкционных материалов.

Перспективой дальнейшей разработки темы является рассмотрение вопросов оптимизации предложенной конструкции (снижение металлоёмкости, применение алюминиевых сплавов с улучшенными характеристиками и др.), её доработка с учётом способов установки подвагонного и внутривагонного оборудования (в том числе, при рассмотрении возможности крупноблочной сборки), уточнение экономического аспекта в рамках СЖЦ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Митяев, А. А. Производство и применение алюминиевых сплавов в транспортном машиностроении [Текст]: научное издание / А. А. Митяев, С. Б. Беликов, И. П. Волчок // Вісн. двигунобудування. – 2006. – № 1. – С. 155–158.

2 Дриц, А. М. Алюминиевые сплавы в самолетостроении: прошлое и настоящее / А. М. Дриц, А. Г. Вовнянко // Цветные металлы, 2010. – № 8. – С. 88–90.

3 Зимбицкий, А. В. Применение композиционных материалов в современном авиастроении, контроль за их состоянием в эксплуатации / А. В. Зимбицкий, Ю. В. Стасюк // Научный вестник МГТУ ГА, 2014. – №208. – С. 99–103.

4 Агуреев, Л. Е. Разработка алюмокомпозитов, легированных микропорошками меди или магния, с малыми добавками оксидных наночастиц Б. С. Иванов, В. И. Костиков, Ж. В. Еремеева, Е. В. Агеев, И. Н. Лаптев, С. В. Савушкина, Р. И. Рудштейн, А. А. Бармин, А. И. Иванушкин, А. А. Ашмарин // Известия юго-западного государственного университета. Серия: Техника и технологии, 2016. – № 3 (20). – С. 9–20.

5 Чайников, К. Н. Общее устройство судов [Текст]: учеб. для судостроител. техникумов / К. Н. Чайников. – Л.: Судостроение, 1971. – 207 с.

6 Гиньяр, Р. Новые вагоны с кондиционированием воздуха для междугородного сообщения Швейцарских федеральных железных дорог / Р. Гиньяр // «Chemins de Fer», 1976. – № 317, С. 50–75.

7 Нортвед, Е. Двухвагонный дизель-поезд ВМ/ДС/92 / Е. Нортвед, Х. Фишер // Glasers Annalen, 1984. – № 12. – С. 339–347.

8 Кардини, Е. Высокоскоростной подвижной состав железных дорог Италии / Е. Кардини [и др.] // Железные дороги мира, 1989. – № 11. – С. 14–19.

9 Лакот, Ф. Двухэтажные поезда вагонов TGV / Ф. Лакот, Л. Клеон // Железные дороги мира, 1992. – № 7. – С. 12–14.

10 Новый пригородный поезд железных дорог Италии // Железные дороги мира, 1997. – № 12. – С. 21.

11 Ноэль, И Новые материалы для вагонов метрополитена / И. Ноэль // Железные дороги мира, 1990. – № 1. – С. 16.

12 Бинневис, Х. Разработка скоростного поезда ICE // Железные дороги мира, 1984. – № 3. – С. 10–15.

13 Абрамова, В. И. Конструкционные материалы в автомобилестроении: учебное пособие / В. И. Абрамова, Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. – 186 с.

14 Якунин, В.И. В будущее России – с высокой скоростью. Монография. – М.: Научный эксперт, 2012. – 216 с.

15 Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 г.: утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 17.06.08 г. № 877-р. – 78 с.

16 Коршунов, С. Д. Совершенствование методов оценки несущей способности и остаточного ресурса кузовов пассажирских вагонов после ремонта [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 : защищена 18.06.2014 : утв. 05.11.2014 / Коршунов Сергей Дмитриевич. – Брянск, 2014. – 172 с.

17 Жуков, А. С. О целесообразности применения алюминиевых сплавов в пассажирском вагоностроении / А. С. Жуков, Д. И. Гончаров, П. С. Ломаков, А. А. Юхневский // Тезисы VI всероссийской научн.-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития вагоностроения», 2014. Брянск: БГТУ – С. 29–31.

18 Жуков, А. С. О целесообразности перехода к проектированию и изготовлению кузова пассажирских вагонов из алюминиевых экструдированных профилей // А. С. Жуков, Д. И. Гончаров, С. Д. Коршунов // Материалы VII Всероссийской научн.-практ. конференции «Проблемы и перспективы развития вагоностроения», 2016. – Брянск: БГТУ – С. 53–55.

19 «Алкоа Россия» и «Тракторные заводы» изготовили инновационный алюминиевый вагон-хоппер // Вагоны и вагонное хозяйство, 2013. – М.: РЖД. – № 1 (33). – С. 41.

20 Вагон-хоппер из алюминиевых сплавов модели 19-1244 // Вагоны и вагонное хозяйство, 2015. – М.: РЖД. – № 3 (43). – С. 26–28.

21 «РМ РЕЙЛ» сертифицировала первый в России вагон из алюминиевых сплавов // Вагоны и вагонное хозяйство, 2017. – М.: РЖД. – № 1 (49). – С. 40.

22 Сертифицирован вагон-хоппер с крышей из алюминиевого сплава // Вагоны и вагонное хозяйство, 2017. – М.: РЖД. – № 4 (52). – С. 11.

23 Вагон-цистерна [Текст]: пат. 180315 Рос. Федерация МПК В61D 5/06 / Савушкин Р. А., Кякк К. В., Калугин А. В., Шевченко Д. В., Попович С. И., Шалыгин А. М. ; заявитель и патентообладатель РЕЙЛ 1520 АйПи ЛТД – № 2017131976; заявл. 13.09.2017; опубл. 08.06.2018, Бюл. № 16. – 6 с.

24 Конюхов, А. Д. Кузова грузовых вагонов из алюминиевых сплавов / А. Д. Конюхов, А. М. Дриц // Железнодорожный транспорт – М.: РЖД, 2016. – № 2, С. 67–69.

25 Конюхов, А. Д. Свойства стыковых сварных соединений алюминиевого сплава / А. Д. Конюхов, А. М. Дриц, А. К. Шуртаков // Вестник ВНИИЖТ, М.: АО «НИИЖТ», 2013. – № 3. – С. 33–38.

26 Конюхов, А. Д. Алюминиевые сплавы и нержавеющие стали в конструкциях кузовов железнодорожного подвижного состава с целью обеспечения их коррозионной стойкости и конструкционных характеристик / А. Д. Конюхов, А. К. Шуртаков, Т. Н. Воробьева // Технология лёгких сплавов, М.: Всероссийский институт легких сплавов, 2010. – № 3. – С. 87–94.

27 Дриц, А. М. Свойства соединений листов алюминиевых сплавов, выполненных сваркой трением с перемешиванием / А. М. Дриц, В. В. Овчинников // Заготовительные производства в машиностроении, М.: Инновационное машиностроение, 2015. – № 10. – С. 7–15.

28 Дриц, А. М. Свойства соединений листов сплава 1565ч в сочетании с другими алюминиевыми сплавами, выполненными сваркой трением с перемешиванием / А. М. Дриц, В. В. Овчинников // Электротехнология, М.: ООО «Наука и технологии», 2015. – № 11. – С. 20–31.

29 Битюцкий, Н. А. Исследование эксплуатационных повреждений вагонов-цистерн с котлами из алюминиевых сплавов / Н. А. Битюцкий //

Транспорт Урала. – Уральский государственный университет путей сообщения, 2009. – № 2 (21). – С. 52–55.

30 Битюцкий, Н. А. Совершенствование методов оценки и восстановления ресурса вагонов-цистерн с котлами из алюминиевых сплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Битюцкий Никита Александрович: – Санкт-Петербург., 2009. – 16 с.

31 Битюцкий, Н. А. Определение предельных геометрических параметров дефектов вагонов-цистерн с котлами из алюминиевых сплавов / Н. А. Битюцкий // Транспорт Урала. – Уральский государственный университет путей сообщения, 2011. – № 4 (31). – С. 34–38.

32 Балалаев, А. Н. Разработка и исследование кузовов подвижного состава нового поколения из экструдированных вакуумных панелей / А. Н. Балалаев, В. А. Краснов, М. А. Паренюк // Транспорт Российской Федерации, 2014. – № 3 (52). – С. 73–74.

33 Балалаев, А. Н. Теплотехнические свойства вагонов и контейнеров из экструдированных алюминиевых панелей / А. Н. Балалаев, А. С. Мокшанов, М. А. Паренюк // Транспорт Российской Федерации, 2014. – № 1 (50). – С. 58–60.

34 Андрончев, И. К. Особенности эксплуатации и ремонта пассажирского вагона с кузовом из алюминиевых панелей, полученных методом экструзии / И. К. Андрончев, А. Н. Балалаев // Вестник транспорта Поволжья, 2013. – № 3 (39). – С. 29–34.

35 Балалаев, А. Н. Исследование модели вакуумной теплоизоляции пассажирского вагона / А. Н. Балалаев, М. А. Паренюк, Г. М. Сергеев, Д. М. Тимкин // Вестник транспорта Поволжья, 2018. – № 2 (68). – С. 13–20.

36 Артемьев, Р. И. Алгоритм проектирования кузова пассажирского вагона из алюминиевых экструдированных панелей / Р. И. Артемьев, А. Н. Балалаев, Д. А. Киселев // Новая наука: опыт, традиции, инновации, 2016. – № 4-2 (77). – С. 107–117.

37 Балалаев, А. Н. Требования к конструкции пассажирского вагона из алюминиевых сплавов / А. Н. Балалаев, М. А. Паренюк, Е. С. Волочек // Наука и образование транспорту, 2014. – № 1. – С. 3–6.

38 Михайлов, Е. Д. Выбор высокотехнологичного свариваемого коррозионностойкого алюминиевого сплава и разработка промышленной технологии производства прессованных полуфабрикатов для изготовления вагонов транспортных систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Михайлов Евгений Дмитриевич: – М., 2010. – 23 с.

39 Шуртаков, А. К. Оптимизация состава и механических свойств сварных и крепёжных соединений алюминиевых сплавов для создания кузовов железнодорожных вагонов нового поколения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Шуртаков Александр Константинович: – М., 2017. – 31 с.

40 Иванов, А. А. Условия целесообразного применения алюминиевых сплавов в вагоностроении: на примере полувагонов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Иванов Александр Анатольевич: – М., 1999. – 24 с.

41 Хилов, И. А. Совершенствование конструкции кузова специализированного полувагона: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Хилов Иван Андреевич: – М., 1999. – 24 с.

42 Kawasaki, T., Yamaguchi, T., Mochida, T., «Numerical analysis and quasi-static compression test on energy absorption structure made of aluminium alloys for railway vehicle», Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol. 74, No. 737, pp. 154–161 (2008).

43 Kawasaki, T., Yamaguchi, T., Mochida, T., «Technology on Railway Vehicles for Europe», HITACHI HYORON, Vol. 89, No. 11, pp. 66–69 (2007).

44 S. W. Kallee, J. Davenport «Trends in design and fabrication of rolling stock», European Railway Review, Issue 1, pp. 75–79 (2007).

45 Ohba, H., Ueda, C., Agatsuma, K., «Innovative Vehicle – the “A-train”», Hitachi Review, Vol. 50, No. 4, pp. 130–133 (2001).

46 Kawasaki, T., Makino, T., Masai, K., Ohba, H., Ina, Y., Ezumi, M. «Application of Friction Stir Welding to Construction of Railway Vehicles», JSME International Journal, Series A, Vol. 47, No. 3, pp. 502–511 (2004).

47 Kawasaki, T., Okuno, S., Masai, K., Yamazi, K., Ohta, T., Ikeda, R and Hasegawa, S., «Structural Analysis of Railway Car Body Made of Aluminium Hollow

Extrusions» Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., (in Japanese), Vol. 65., No. 636, A, pp. 184–190 (1998).

48 Industrial Research Institute, Aluminium Alloys and Lightweight of Railway Vehicle (in Japanese), 1990, p. 249.

49 Xie, G., Thompson, D. J., Jones, S. J. C.: A modeling approach for the vibroacoustic behavior of the aluminium extrusions used in railway vehicles, Journal of Sound and Vibration, 293, pp. 921–932 (2006).

50 Сент-Клер Девиль, Анри Этьен [Электронный ресурс] – режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сент-Клер_Девиль,_Анри_Этьен (дата обращения 19.12.2018).

51 Сайт об алюминии. Проект компании RUSAL [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://aluminiumleader.ru/application/transport/> (дата обращения 19.12.2018).

52 Велти, Г. Новые материалы в конструкции грузовых вагонов / Г. Велти // Железные дороги мира, 1982. – № 3. – С. 14–19.

53 Горбунов, Ю. А. Применение изделий из алюминиевых сплавов при производстве и ремонте наземного и водного транспорта в РФ / Ю. А. Горбунов // Технология лёгких сплавов, 2015. – № 1. – С. 87–92.

54 Киселев, И. П. Краткий обзор истории высокоскоростных поездов в Японии. Часть 1 / И. П. Киселев // Железные дороги мира, 2005. – № 7. – С. 7–16.

55 Киселев, И. П. Краткий обзор истории высокоскоростных поездов в Японии. Часть 2 / И. П. Киселев // Железные дороги мира, 2005. – № 8. – С. 9–20.

56 Папазян, А. Все о высокоскоростных поездах TGV [Текст] / А. Папазян; [пер. с нем. Антонов С. С.]. – М.: Учеб. -методический центр по образованию на ж.-д. трансп.: Пиар-Пресс, 2010. – 127 с.

57 Семейство двухэтажных поездов TGV // Железные дороги мира, 2014. – № 8. – С. 55–60.

58 TGV – 30 лет // Железные дороги мира, 2011. – № 11. – С. 9–13.

59 Двухэтажные высокоскоростные поезда TGV Duplex // Железные дороги мира, 2010. – № 4. – С. 24–31.

60 От опытного поезда ICE S к серийному Velaro // Железные дороги мира, 2008. – № 3. – С. 40–47.

61 Высокоскоростной поезд ICE 3 в международных перевозках // Железные дороги мира, 2006. – № 9. – С. 30–38.

62 Липп, А. Высокоскоростной поезд Velaro для России // А. Липп, Д. Йон, Р. Манглер, В. А. Гапанович, А. С. Назаров, О. Н. Назаров, В. П. Шилкин // Железные дороги мира, 2009. – № 1. – С. 36–50.

63 Киселев, И. П. Краткий обзор истории европейских высокоскоростных поездов. Часть 2 / И. П. Киселев // Железные дороги мира, 2006. – № 1. – С. 18–41.

64 Киселев, И. П. Краткий обзор истории европейских высокоскоростных поездов. Часть 1 / И. П. Киселев // Железные дороги мира, 2005. – № 12. – С. 20–37.

65 Подготовка и анализ научных материалов для разработки программ научно-технического прогресса отрасли вагоностроения на 1991–2005 гг. Этап В. Проанализировать тенденции развития отечественного и зарубежного железнодорожного транспорта с целью выявления перспективных технико-экономических требований к конструкциям пассажирских вагонов локомотивной тяги. КФ ВНИИВ; Рук. этапа темы Ю. П. Органов. – Тема 86.87.4.003. – Калинин, 1987. – 99 с.

66 Исследования по совершенствованию сталеалюминиевого кузова для пассажирских вагонов дл. 26 м / КФ ВНИИВ; Рук. темы Захаров Е. Ф. – индекс темы 49-65/М. – Калинин, 1966. – 84 с.

67 Расчет кузова вагона ЦМВОА-69. 191.01.00.000 Рс / Калининский ордена Ленина Вагоностроительный завод; О. Г. К. //Калинин, 1968. – 321 с.

68 Исследования по созданию пассажирских вагонов для скоростей движения до 200 км/час. Раздел I. Разработка предложений по проектированию кузова пассажирского вагона для скоростей движения до 200 км/час / КФ ВНИИВ; Рук. темы Г. Павлушин. – индекс темы В-05-65/а. – Калинин, 1967. – 93 с.

69 Проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, связанных с созданием пассажирского вагона для скоростей движения 200 км/ч. I. Проектирование и изготовление модели кузова, проведение ее испытаний.

Технико-экономический анализ конструкции кузова / КФ ВНИИВ; Рук. темы Г. Павлушин. – индекс темы В-05-65/а. – Калинин, 1967. – 93 с.

70 Гуткин, Л. В. Электропоезд ЭР200 / Л. В. Гуткин, Ю. Н. Дымант, И. А. Иванов // Электропоезд ЭР200. – М., Транспорт, 1981 г. – 192 с.

71 Саввов, В. М. Высокоскоростной поезд нового поколения «Сокол» / В. М. Саввов // Железнодорожный транспорт, 2000. – № 5. – С. 1–8.

72 Акопян, Г. А. «Сокол» готовится к полету / Г. А. Акопян, А. К. Брусов // Локомотив, 2000. – № 7. – С. 33–36.

73 Арсентьев, А. С. Основные результаты испытаний опытного шестивагонного электропоезда «Сокол» / А. С. Арсентьев, В. М. Саввов / Вестник ВНИИЖТ, 2002, № 4. – С. 55–58.

74 Гурьев, А. И. И какие же русские не любили быстрой езды? История обреченного проекта / А. И. Гурьев. – СПб.: ООО «Издательско-полиграфическая компания «КОСТА», 2009. – 360 с.

75 Технология прессования алюминия / Прадип К. Саха / Пер. с английского по лицензии издательства ASM International, М.: НП «АППРАЛ», 2015. – 354 с.

76 Карманов, В. В. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва / В. В. Карманов, А. Л. Каменева, В. В. Карманов // Вестник ПНИПУ, Аэрокосмическая техника, 2012. – № 32. – С. 67–77.

77 Котлышев, Р. Р. Механизм образования соединения и особенности технологии сварки алюминиевых сплавов трением с перемешиванием: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Котлышев Роман Рефатович: – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 22 с.

78 Стаценко, В. Н. Анализ технологии сварки методом трения с перемешиванием / В. Н. Стаценко, Е. Н. Негода, А. Е. Сухорада, К. А. Полуцкий // Вестник инженерной школы ДВФУ, 2017. – № 1 (30), С. 15–21.

79 Способ сварки металлов трением, [Текст] пат. 195846 СССР МПК В23К 20/12 / Клименко Ю. В. – № 1036054/25-27; заявл. 09.11.1965; опубл. 04.05.1967. – 1 с.

80 Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, M. G., Temple-smith, P. and Dawes, C. J. (1991) International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8. – 2 с.

81 Kazuhiro Kaida, Shimonoseki, Akira Sakae, Kobe (2010) Patent No.: US 7669384 B2. – Date of Patent 02.03.2010. – 12 с.

82 Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. Часть 1. Словарь [Текст]: ISO 25239-1:2011. – Изд. 15.12.2011. – 22 с.

83 Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. Часть 2. Проектирование сварных соединений [Текст]: ISO 25239-2:2011. – Изд. 15.12.2011. – 5 с.

84 Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. Часть 3. Квалификация операторов [Текст]: ISO 25239-3:2011. – Изд. 15.12.2011. – 12 с.

85 Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. Часть 4. Характеристики и квалификация сварочных процедур [Текст]: ISO 25239-4:2011. – Изд. 15.12.2011. – 22 с.

86 Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. Часть 5. Требования к качеству и контролю [Текст]: ISO 25239-5:2011. – Изд. 15.12.2011. – 9 с.

87 Шадур, Л. А. Вагоны: конструкция, теория и расчёт / Л. А. Шадур, И. И. Челноков, Л. Н. Никольский, Е. Н. Никольский, П. Г. Проскурнев, В. Н. Котуранов [и др.] / Под. Ред. Л. А. Шадура. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1980. – 440 с.

88 Котуранов, В. Н. Нагруженность элементов конструкции вагона / В. Н. Котуранов [и др.]. – М.: Транспорт, 1991. – 238 с.

89 Котуранов, В. Н. Строительная механика и надёжность вагонов / В. Н. Котуранов, А. И. Быков, О. К. Буренков / М.: МИИТ, 1988. – 99 с.

90 Котуранов, В. Н. Аналитический и конечноэлементный расчёт напряжённого состояния кузова пассажирского ЦМВ / В. Н. Котуранов, Б. Н. Покровский, М. П. Козлов // учебное пособие – М.: РГОТУПС, 2008. – 39 с.

91 Беспалько, С. В. Определение статической и динамической нагруженности грузового помещения цистерны для перевозки криогенных продуктов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Беспалько Сергей Валерьевич: – М., 1990. – 22 с.

92 Гордеев, М. А. Математическая модель работы жертвенных элементов крэш-системы кузова пассажирского вагона при аварийном соударении / М. А. Гордеев, С. В. Беспалько, К. А. Сергеев // Наука и техника транспорта – М.: МГУПС, 2015. – С. 27–33.

93 Филиппов, В. Н. Расчёт на прочность котлов цистерн для перевозки сжиженных газов / В. Н. Филиппов, А. В. Смольянинов, В. П. Мальцев // Газовая промышленность, 1998. – № 5. – С. 56–59.

94 Королева, А. М. Анализ комфортабельности пассажирских вагонов и влияние её на трудовую деятельность работников железнодорожного комплекса / А. М. Королева, В. М. Пономарев, М. Ф. Вильк, О. С. Юдаева, В. Н. Филиппов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – Пензенский государственный технологический университет, 2018. – № 2 (42). – С. 50–53.

95 Воронин, Н. Н. Применение математических методов и ЭВМ при анализе и оценке эксплуатационной прочности сварных конструкций / Н. Н. Воронин, С. Н. Киселев, Ю. Н. Аксенов / Информационные материалы: СЭВ. Киев: ИЗС им. Патова, 1989. – Вып. 1 (35). – С. 25–31.

96 Воронин, Н. Н. Методика расчёта напряжённо-деформированного состояния в зонах концентрации напряжений железнодорожных цистерн / Н. Н. Воронин, С. Н. Кательников, И. В. Плотников // Наука и техника транспорта, М.: МГУПС, 2003. – № 4, С. 42–47.

97 Ромен, Ю. С. Математическое моделирование при исследовании взаимодействия экипажа и пути / Ю. С. Ромен // Железнодорожный транспорт, 2017. – № 11. – С. 62–64.

98 Ромен, Ю. С. Моделирование колебаний кузова железнодорожного вагона / Ю. С. Ромен, Я. М. Клебанов, Е. А. Солдусова // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. – СамГУПС, 2013. – № 3 (39). – С. 141–147.

99 Барбарич, С. С. Грузовые и пассажирские вагоны нового поколения [Текст] / С. С. Барбарич, А. М. Краснобаев, В. В. Новоселов // Железнодорожный транспорт, 2008. – № 4. – С. 57–61.

100 Полувагон из алюминиевых сплавов [Текст]: пат. 2345918 Рос. Федерация МПК В61D 17/00 / Конюхов А. Д., Журавлева Л. В., Краснобаев А. М., Шаринов И. Л., Саликов В. А., Рощупкин А. Н., Корольков В. И., Чернов В. М. ; заявитель и патентообладатель ОАО «РЖД». – № 2007125563/11; заявл. 06.07.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4. – 9 с.: ил.

101 Пигунов, А. В. Комплексная оценка технического состояния и остаточной несущей способности кузовов пассажирских вагонов: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / Пигунов Анатолий Владимирович. – Гомель. БелГУТ, 2002. – 17 с.

102 Приходько, В. И. Расчет динамических показателей пассажирского вагона / В. И. Приходько // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта, 2006. – С. 146–152.

103 Самошкин, С. Л. Из опыта создания отечественного скоростного пассажирского подвижного состава / С. Л. Самошкин, А. Н. Скачков, А. А. Юхневский // Железнодорожный транспорт, 2019. – № 3. – С. 48–53.

104 Василевский, В. В. Идентификация изгибной жёсткости кузова пассажирского вагона теоретико-экспериментальным методом / В. В. Василевский, А. Н. Скачков, А. А. Юхневский / Проблемы и перспективы развития вагоностроения. – Сборник научных трудов VIII Всероссийской науч.-техн. конф., Брянск. – 2019. – С. 36–39.

105 Коршунов, С. Д. Методика расчётно-экспериментальных исследований кузовов современного подвижного состава / С. Д. Коршунов, А. Н. Скачков, С. Л. Самошкин, Д. И. Гончаров, А. С. Жуков // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2015. – № 4 (45). – С. 38–47.

106 Скачков, А. Н. Разработка и обоснование принципов метода экспериментального определения параметров изгибных колебаний кузовов пассажирских вагонов нового поколения / А. Н. Скачков, С. Л. Самошкин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщений, 2018. – № 1 (69). – С. 59–64.

107 Скачков, А. Н. Оценка конструктивных решений на основе расчётно-экспериментальных исследований несущей способности кузова пассажирского вагона

колеи 1435 мм / А. Н. Скачков, С. Л. Самошкин, С. Д. Коршунов, Д. И. Гончаров, П. С. Ломаков // Тяжелое машиностроение, 2018. – № 1–2. – С. 34–40.

108 Коршунов, С. Д. Динамические испытания пассажирских вагонов, вновь построенных и прошедших восстановительные ремонты / С. Д. Коршунов // Вестник ростовского государственного университета путей сообщения, 2011. – № 1 (41). – С. 62–67.

109 Черкашин, Ю. М. Разработка методики оценки ресурса несущих конструкций кузовов вагонов, прошедших капитально-восстановительный ремонт / Ю. М. Черкашин, С. Д. Коршунов, Д. Я. Антипин // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, 2011. – № 1. – С. 19–22.

110 Кобищанов, В. В. Выбор рациональной конструкции двухслойной обшивки боковых стен пассажирских вагонов / В. В. Кобищанов, Д. Я. Антипин, Д. Ю. Расин, А. М. Высоцкий // Вестник БГТУ, 2014 – № 4. – С. 8–11.

111 Кобищанов, В. В. Разработка устройств пассивной безопасности пассажирских вагонов / В. В. Кобищанов, Д. Я. Антипин, С. Г. Шорохов // Мир транспорта, 2015. – № 2 (57). – С. 220–226.

112 Лозбинец, В. П. Актуальные направления исследований в области проектирования вагонов / В. П. Лозбинец, Ф. Ю. Лозбинец // Вестник БГТУ. – 2012. – № 1. – С. 41–49.

113 Лозбинец, В. П. Проектирование оптимальных конструкций кузовов вагонов с учетом начальных несовершенств / В. П. Лозбинец, А. А. Лагутина // Проблемы и перспективы развития вагоностроения. Материалы II междунар. науч.-практ. конф. Брянск: БГТУ, 2005. – С. 45–48.

114 Антипин, Д. Я. Исследование влияния различных факторов на допускаемую величину начальной изогнутости несущих элементов кузовов вагонов / Д. Я. Антипин, А. А. Лагутина, А. М. Высоцкий // Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем. Сборник науч. Трудов Всероссийской науч.-техн. конф. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 75–78.

115 Антипин, Д. Я. Обоснование методики повышения комфорта и безопасности при перевозках пассажиров на железнодорожном транспорте за счёт уменьшения вибрационной нагруженности кузова пассажирского вагона / Д. Я. Антипин, Е. В. Лукашова // Перспективное развитие науки, техники и технологий. Сборник науч. статей материалы 8-й Международной науч.-практ. конф. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2018. – С. 10–12.

116 Антипин, Д. Я. Методика исследования усталостной долговечности сварных несущих конструкций ходовых частей пассажирских вагонов / Д. Я. Антипин, В. В. Кобищанов, Н. Ю. Тысева // Современные инновации в науке и технике. Сборник трудов 7-й Всероссийской науч.-техн. конф. с международным участием. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2017. – С. 16–18.

117 Бороненко, Ю. П. Расчёт узлов вагонов на прочность МКЭ / Ю. П. Бороненко, А. В. Третьяков, Г. Е. Сорокин // Учебное пособие и руководство к использованию учебных пакетов программ. – Л.: ЛИИЖТ, 1991. – 39 с.

118 Бороненко, Ю. П. Стратегические задачи вагоностроителей в развитии тяжеловесного движения / Ю. П. Бороненко // Транспорт Российской Федерации, Санкт-Петербург: ООО «Издательский дом Т-пресса», 2013. – № 5 (48). – С. 68–73.

119 Третьяков, А. В. Экспериментальная оценка спектров ударного отклика подвижного состава / А. В. Третьяков, О. А. Третьяков, М. В. Зимакова, А. А. Петров // Наука та прогрес транспорту, Днепропетровск: Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. Академика В. Лазаряна, 2017. – № 3 (69). – С. 147–159.

120 Соколов, М. М. Динамическая нагруженность вагона / М. М. Соколов, В. Д. Хусидов, Ю. Г. Минкин. – М.: Транспорт, 1981. – 207 с.

121 Битюцкий, А. А. Применение метода суперэлементов к расчёту конструкций вагонов / А. А. Битюцкий, О. Н. Петров, С. В. Павлов // Динамика вагонов: сб. научн. тр., Л.: ЛИИЖТ, 1984. – С. 46–55.

122 Никольский, Е. Н. Оболочки с вырезами типа вагонных кузовов / Е. Н. Никольский – М.: Машгиз, 1963. – 312 с.

123 Numerical static and dynamic stress analysis on railway passenger and freight car models / C. Baykasoglu, E. Sunbuloglu, S. E. Bozdog [et al.] // Intern. Iron & Steel Symposium (02.04.2012) / Karabuk University. – Istanbul, 2012. – p. 579-586.

124 A review of mid-frequency vibro-acoustic modelling for highspeed train extruded aluminium panels as well as the most recent developments in hybrid modelling techniques / L. Ji, X. Shen, X. Xiao, Z. Wen, X. Ji // J. Mod. Transport. – 2015. – p. 159–168.

125 Wennberg, D. A lightweight car body for high-speed trains – literature study / tech. rep., KTH, Stockholm, Sweden, 2010. – 29 с.

126 Wennhage, P Structural – Acoustic Optimization of Sandwich Panels / PhD thesis, Department of Aeronautics, KTH, Stockholm, Sweden, 2001. – 34 с.

127 Lee, W. G. «The next generation material for lightweight railway car body structures: Magnesium alloys» / W. G. Lee, J-S. Kim, S-J. Sun and J-Y. Lim // Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit. – No. 231 (1). – pp. 25–42.

128 Evans AG, Hutchinson JW, Fleck NA, et al. The topological design of multifunctional cellular metals. Prog Mater Sci 2001; 46: 309–327.

129 Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ –ВНИИЖТ, 1983. – 260 с.

130 Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Требования к прочности и динамическим качествам [Текст] : ГОСТ 34093-2017 ; введ. 01.01.2018. – 42 с.

131 Модель 61-4440. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.tvz.ru/catalog/passenger/item_detail.php?ELEMENT_ID=182 (дата обращения 12.12.2019).

132 Ковалев, В. В. Особенности получения сталеалюминиевых соединений методами сварки плавлением / В. В. Ковалев, Р. С. Михеев, Н. В. Коберник // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. сер. машиностроение, 2016. – № 4. – С. 93–112.

133 Аллюминиевые детали объемной штамповки для подвижного состава // Железные дороги мира, 2016. – № 7. – С. 52.

134 Гуреева, М. А. Алюминиевые сплавы в сварных конструкциях современных транспортных средств / М. А. Гуреева, О. Е. Грушко // Машиностроение и инженерное образование, 2009. – № 3 (20). – С. 27–41.

135 Конюхов, А. Д. Конструкционные материалы для кузовов пассажирских вагонов и мотор-вагонного подвижного состава / А. Д. Конюхов // Тяжелое машиностроение, 2004. – № 11. – С. 5–8.

136 Выбор и исследование высокопрочных алюминиевых сплавов для скоростного пассажирского поезда и разработка технологии их сварки / КФ ВНИИВ ; Рук. темы Козлов И. Т. – индекс темы 48-68 п. – Калинин, 1970. – 218 с.

137 Жуков, А. С. Оценка несущей способности элементов кузовов пассажирских вагонов при поперечном изгибе / А. С. Жуков, Д. И. Гончаров, А. А. Юхневский // Материалы VII науч.-практ. конференции «Проблемы безопасности на транспорте», 2015. – Гомель: БелГУТ – С. 33–34.

138 Жуков, А. С. Оценка деформаций фрагментов оболочки кузова пассажирского вагона из стали и из экструдированных алюминиевых профилей / А. С. Жуков // Материалы VII Всероссийской науч.-практ. конференции «Проблемы и перспективы развития вагоностроения», 2016. – Брянск: БГТУ – С. 50–53.

139 Жуков, А. С. О выполнении эмпирических требований на проектирование вагонов для кузовов пассажирских вагонов из экструдированных алюминиевых панелей / А. С. Жуков, Д. И. Гончаров, А. А. Юхневский // Труды РГУПС, 2018. – № 4 (45). – С. 52–56.

140 Рычков, С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran / С. П. Рычков. – М: ДМК Пресс, 2013. – 784 с.

141 Жуков, А. С. К вопросу о соответствии частоты первого тона изгибных колебаний кузовов пассажирских вагонов из алюминиевых сплавов нормативному значению / А. С. Жуков // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XI Международной научн.-техн. конф., Санкт-Петербург, 6–10 июля 2016 г. – СПб. : ФГБОУ ВО РГУПС, 2016. – С. 63–65.

142 Скачков, А. Н. Определение параметров изгибных колебаний кузовов вагонов и оценка ходовых динамических и эксплуатационных показателей электропоезда нового поколения / А. Н. Скачков, С. Л. Самошкин, С. Д. Коршунов, П. С. Ломаков, А. С. Жуков // Вестник РГУПС, 2018. – № 4 (72). – С. 78–87.

143 Скачков, А. Н. Разработка основополагающих принципов экспериментального метода определения изгибной жесткости кузовов цельнометаллических вагонов / А. Н. Скачков, С. Л. Самошкин, С. Д. Коршунов, А. С. Жуков, Д. А. Никифоров // Тяжелое машиностроение, 2018. – № 10. – С. 32–38.

144 Конюхов, А. Д. Экструдированные алюминиевые панели – перспективный материал для кузовов вагонов / А. Д. Конюхов, Л. В. Журавлева, А. К. Шуртков // Вагоны и вагонное хозяйство, 2007. – № 2. – С. 36–38.

145 Мехеда, В. А. / Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие / В. А. Мехеда. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.

146 Жуков, А. С. Отработка методики исследования прочности вагонных конструкций из алюминиевых сплавов / Жуков А. С. // Вестник РГУПС, 2016. – № 1 (61). – С. 43–50.

147 Haydn N. G. Wadley, Multifunctional periodic cellular metals [Электронный ресурс] – режим доступа:

http://www2.virginia.edu/ms/research/wadley/Documents/Publications/Multifunctional_Periodic_Cellular_Metals.pdf (дата обращения 04.02.2020).

148 Лехницкий, С. Г. Анизотропные пластинки / С. Г. Лехницкий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1957. – 463 с.

149 Тимошенко, С. П. Пластины и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Наука, 1966. – 636 с.

150 Пелех, Б. Л. Обобщенная теория оболочек / Б. Л. Пелех: учеб. пособие. – Львов: Выща школа, 1978. – 159 с.

151 Лейбензон, Л. С. Вариационные методы решения задач теории упругости / Л. С. Лейбензон. – М.; Л.: ОГИЗ Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1943. – 288 с.

152 Тимошенко, С. П. Механика материалов / С. П. Тимошенко, Дж. Гере / Перевод с англ. яз. под ред. Э. И. Грилюка. М.: Мир, 1976. – 480 с.

153 Фихтенгольц, Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления [Текст] : учебное пособие / Г. М. Фихтенгольц. – 4-е изд. – т. 3. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1966. – 656 с.

154 Канторович, Л. В. Приближенные методы высшего анализа / Л. В. Канторович, В. И. Крылов – изд. 5-е, испр. – М.; Л.: Физматлит, 1952. – 696 с.

155 Голуб, Дж. Матричные вычисления / Дж. Голуб, Ч. Ван Лоун – М.: Мир, 1999. – 548 с.

156 Де Бор, К. Практическое руководство по сплайнам / К. Де Бор – Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с.

157 Михлин, С. Г. Вариационные методы в математической физике / С. Г. Михлин – М.: Наука, 1970. – 512 с.

158 Бидерман, В. Л. Некоторые вычислительные методы решения задач строительной механики, приводимых к обыкновенным дифференциальным уравнениям. – В кн.: Расчеты на прочность. – М.: Машиностроение, 1976. – С. 8–36.

159 Фаддеев, Д. К. Вычислительные методы линейной алгебры / Д. К. Фаддеев, В. Н. Фаддеева. – изд. 2-е, доп. – Физматгиз, 1963. – 735 с.

160 Светлов, В. И. Технические решения по механике пассажирских вагонов. Метод обоснования: автореф. монограф. ... док. техн. наук: 05.22.07 / Виктор Иванович Светлов; МГУПС. – М., 2003. – 38 с.

161 Сайт Евразийской экономической комиссии [Электронный ресурс] – режим доступа: http://www.eurasiancommission.org/ru/act/prom_i_agroprom/dep_prom/SiteAssets/ОТРАСЛЕВОЙ%20АНАЛИЗ%20жд%20машиностроение.pdf (дата обращения 15.12.2019).

162 Жуков, А. С. О стоимости жизненного цикла пассажирского вагона с кузовом из экструдированных панелей / А. С. Жуков // Сборник науч. трудов «Транспорт: наука, образование, производство», т. 2, техн. науки, 2018. – РГУПС. – С. 89–92.

163 Понтиселли, К. Стоимость жизненного цикла подвижного состава: от теории к практике / К. Понтиселли // Техника железных дорог, 2009. – № 4 (8). – С. 19–25.

164 Сайт компании производителя [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://ulkm.ru/produkcija/elektropoezd-lastochka/> (дата обращения 19.02.2020).

165 Скоростной пассажирский поезд постоянного формирования серии «Стриж» производства компании «Patentes Talgo S. L. (Испания) [Электронный ресурс] – режим доступа: http://www.rzd-expo.ru/innovation/high_speed_traffic_and_infrastructure/skorostnoy-passazhirskiy-poezd-strizh/ (дата обращения 19.02.2020).

166 Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта (основные положения), утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 27.12.2007 № 2459р. – 62 с.

167 Энергосбережение на железнодорожном транспорте: учебник для вузов / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, Б. А. Аржанников [и др.] ; под ред. В. А. Гапановича. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2012. – 620 с.

168 Приказ Минтранса РФ от 13 января 2011 г. № 15 «О внесении изменений в приказ Министерства путей сообщения Российской Федерации от 4 апреля 1997 г. № 9Ц». – 9 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список патентов

Таблица А.1 – Список рассмотренных патентов

Дата подачи	Номер	Наименование
1	2	3
27.08.1991	US5042395	Composite vehicle body having sandwich panels integrally formed with frame parts to form individual body modules which are connected to other body modules to form the vehicle body
19.02.1991	US4993329	Car body for railway rolling stock and method of fabricating the car body
25.06.1990	EP0405889B1	Railway car body and methods of making them
04.12.1990	US4974900	Vehicle superstructure, in particular for railway carriages for passenger transport
24.03.1992	US5098007	Method of manufacturing a vehicle body
20.11.1992	EP0544473A1	Vehicle having car body of laminated panel structure side construction
24.01.1995	US5383592	Sheet-steel component and light sheet metal component welded joint
24.11.1992	EP0544498A1	Body structure of railroad car
08.11.1994	US5362345	Method of manufacturing integral railway coach bodies
02.07.1993	EP0605366A1	Body structure for railway vehicles
24.01.1995	US5383406	Body structure for railway vehicles
15.07.1993	EP0785121A1	Railway cars and methods of manufacture thereof
02.08.1994	US5333554	Vehicle and method of producing the same

Продолжение таблицы А.1

1	2	3
17.03.1995	EP0672567A1	Railway vehicle bodies and methods of manufacturing them
18.06.1995	US5433151	Railway car body structures and methods of making them using welded honeycomb panels connected in an edge to edge relation
02.01.1996	US5480729	Honeycomb panel having inserts for fixing a member in an opening in the panel
15.03.1994	EP0618124A1	Caisse de materiel ferroviaire a structure de profiles en coques
29.09.1998	US5813592	Friction stir welding
17.08.1995	EP0697319A1	Car body for a railway rolling stock
08.01.1997	US5784970	Carriage body frame
11.11.1997	US5685229	Railway car body structures and method of making them
24.01.1996	EP0786390A1	Wagenkasten für Schnellbahnen
06.03.2001	US6196136B1	Car and side structure for car and method of manufacturing the same
24.09.2002	US6454345B1	Rail vehicle body
11.04.2000	US6640515B1	Frame member used friction stir welding
26.02.2001	US6446562B1	Car body
27.02.2001	EP1213201A2	Car body of a railway car
28.08.2002	US6722285B2	Railway car
05.07.2002	US6722286B2	Structure and railway car
09.04.2002	US6550397B2	Car body
04.06.2002	US6708626B2	Double-walled damping structure
07.12.2004	EP1557337A1	Schienenfahrzeug mit einem Wagenkasten-vorbau

Продолжение таблицы А.1

1	2	3
05.07.2006	EP1839989A2	Rail vehicle, manufacturing method thereof, and hollow shape member used for the same
31.05.2007	US7958831B2	Lateral face of a rail vehicle body
01.06.2007	US8166888B2	End structural assembly of a rail car body
02.09.2005	US7438001B2	Car body structure
06.06.2008	EP2130739B1	Rail car underframe assembly and modular car body for a rail vehicle
06.05.2008	US20080276831A1	Car body structure
06.06.2008	EP2130738A1	Rail vehicle car body and method of assembly
23.06.2003	US7520104B2	Friction stir welding member
05.10.2011	CN201998995U	—
22.01.2013	US8356561B2	Side wall for a rail vehicle
06.06.2013	US2013/0139718A1	Bodyshell structure of railcar
08.08.2013	US2013/0202846A1	Extruded elements