

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Российский университет транспорта»  
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи

**Шинкарук Андрей Сергеевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЖИЗНЕННОГО  
ЦИКЛА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА  
НА ОСНОВЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ  
ЕГО ХРЕБТОВОЙ БАЛКИ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук, профессор  
Куликов Михаил Юрьевич

Москва – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА .....</b>	<b>11</b>
1.1 Продолжительность жизненного цикла пассажирского вагона.....	11
1.2 Система технического обслуживания и планового вида ремонта пассажирских вагонов.....	19
1.3 Анализ оценки остаточного ресурса несущих элементов кузова пассажирского вагона и способов его продления.....	21
1.4 Анализ способов восстановления работоспособности элементов пассажирских вагонов.....	27
1.5 Выводы по первому разделу.....	29
<b>2 ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ ХРЕБТОВОЙ БАЛКИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА.....</b>	<b>30</b>
2.1 Анализ структуры парка пассажирских вагонов, используемых в перевозочной деятельности на территории Российской Федерации и сосредельных государств.....	30
2.2 Роль хребтовой балки в конструкции и обеспечении долговечности пассажирского вагона.....	34
2.3 Существующая нормативно-технологическая документация по техническому обслуживанию и планово-предупредительному ремонту хребтовой балки.....	38
2.4 Выводы по второму разделу.....	44
<b>3 ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА И РАЗРУШЕНИЯ ХРЕБТОВОЙ БАЛКИ В ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА.....</b>	<b>46</b>
3.1 Анализ напряжённно-деформированного состояния хребтовой балки в период эксплуатации.....	46
3.2 Оценка состояния вагонов в эксплуатации, определение факторов, влияющих на образование коррозионных дефектов в элементах хребтовой балки пассажирского вагона.....	71

3.3 Оценка материала хребтовой балки по прочностным параметрам...	80
3.4 Топография микроразрушения хребтовой балки в процессе эксплуатации.....	84
3.5 Исследование полей напряжений в хребтовой балке .....	91
3.6 Исследование состояния поверхностного слоя в фрагментах хребтовых балок, выработавших нормативный ресурс.....	114
3.7 Выводы по третьему разделу.....	121
<b>4 ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА.....</b>	<b>123</b>
4.1 Влияние дробеструйной обработки на формирование напряжений в поверхностных слоях хребтовой балки.....	123
4.2 Расчёт циклической долговечности рамы пассажирского вагона модели 61-425, выработавшего предельный нормативный срок службы.....	129
4.3 Изучение эксплуатационных свойств предлагаемого покрытия.....	140
4.4 Исследование влияния дробеструйной обработки поверхностного слоя хребтовой балки на развитие коррозии.....	144
4.5 Экспериментальное нанесение водоразбавляемой краски по металлу на участки хребтовой балки вагона модели 61-4186.....	147
4.6 Выводы по четвёртому разделу.....	152
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>154</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....</b>	<b>156</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>158</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А.....</b>	<b>175</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Решением Правительства Российской Федерации в рамках реализации Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. [123] поставлена задача о формировании устойчивой и доступной транспортной системы для обеспечения транспортной целостности, безопасности и обороноспособности страны, обеспечения условий для реализации потребностей граждан в перевозках как инфраструктурного базиса, а также выполнения воинских и специальных перевозок в железнодорожном сообщении. Для реализации данной задачи в настоящее время в части обеспечения пассажирских перевозок используются более 18,5 тысяч пассажирских вагонов, однако статистический анализ данных за 2010–2020 гг. показывает, что потребность в пассажирском подвижном составе в период летних и каникулярных перевозкам только растет и пополнение пассажирскими вагонами за последние 10 лет снижен более чем на 35 % от его выбывания по сроку службы, поэтому обеспечить покрытие потребности в пассажирских перевозках можно только за счет продления срока службы существующих вагонов при проведении капитально-восстановительного ремонта с безусловным обеспечением требований безопасности движения его основных несущих элементов.

Самыми распространёнными типами пассажирских вагонов на сегодняшний день являются модели 61-4447, 61-4179, 61-4194 и 61-826. При этом треть вагонов пассажирского парка имеют срок службы 22 и более лет. Несмотря на то, что в последние 5 лет приобретение подвижного состава значительно растет, исключение существующих вагонов, выработавших нормативный срок, продолжается и не компенсируется их приобретением. И если вновь приобретаемый подвижной состав в полной мере отвечает всем существующим требованиям по безопасности и комфортному условию проезда

пассажиrow, то вагоны, изготовленные в конце XX и начале XXI веков, устарели как в комфортабельности, так и из-за развития коррозионного износа в основных несущих элементах [54, 74]. В процессе эксплуатации физический износ вагонов неодинаков, так как невозможно сравнивать износ вагонов, курсирующих в различных климатических условиях и на различных направлениях [58]. Например, техническое состояние вагонов, курсирующих на участках Москва – Воронеж, Москва – Брянск, невозможно сравнивать с подвижным составом, курсирующим в направлениях Москва – Новый Уренгой, Москва – Владивосток. Следовательно, при проведении планового ремонта вагонов с разными условиями эксплуатации объем восстановительных работ значительно различается [68]. Даже при значительных затратах на ремонт риск возникновения нештатной работы оборудования или появления неисправности, связанной с коррозионными воздействиями на раму и основные элементы кузова, у вагонов с разной степенью эксплуатации тоже будут разными [67, 68, 69, 72].

Таким образом, вопросы возможности продления ресурса пассажирского подвижного вагона на еще более длительный, чем заложено в нормативной документации [105, 106], срок и содержания несущих элементов конструкции вагонов в технически исправном состоянии с максимальной защитой от внешних факторов, к которым относятся воздействие окружающей среды, попадание щебня в процессе движения на элементы экипажной части, воздействие кислотных и щелочных средств при обмывке, является **актуальным** и вытекает из первоочередных задач, стоящих перед железнодорожным транспортом страны [71, 123].

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросами оценки остаточного срока службы грузовых и пассажирских вагонов с учетом их технического состояния, оценки усталостной прочности и долговечности несущих конструкций вагонов занимались Д.Я. Антипин, С.Н. Ашуркова, А.А. Иванов, В.А. Карпычев, В.В. Кобищанов, С.Д. Коршунов, В.А. Лебедев,

Е.Н. Никольский, М.Н. Овечников Д.Ю. Расин, П.А. Устич, С.Г. Шорохов и другие [1, 65, 66, 67, 68, 73, 74, 75, 88, 134, 136, 145].

Вопросы защиты металлических элементов от воздействия коррозии путем нанесения лакокрасочного покрытия, снижения темпов коррозионного воздействия на структуру металла, образования коррозионных язв путем установления и применения лакокрасочного и антикоррозионного покрытия отражены в работах ученых В.М. Ермакова, В.Г. Калыгина, М.А. Шлугера, А.Д. Яковлева [32, 41, 57, 62, 148].

Проведенный анализ позволил реализовать способ защиты хребтовой балки от воздействия внешних факторов и коррозионного влияния на хребтовую балку пассажирского вагона.

**Целью диссертационной работы** является увеличение продолжительности жизненного цикла пассажирского вагона, в конструкцию рамы которого входит хребтовая балка, за счет увеличения её долговечности.

**Задачи исследования:**

1 проанализировать структуру парка пассажирских вагонов, используемых в перевозочной деятельности на территории Российской Федерации и сопредельных государств;

2 провести оценку состояния элементов хребтовых балок, прошедших полный цикл эксплуатации, на соответствие прочностным характеристикам;

3 определить участки хребтовой балки, подверженные наибольшему коррозионному воздействию в процессе эксплуатации;

4 выявить причины локальных коррозионных воздействий и микроразрушений на хребтовую балку в процессе эксплуатации;

5 разработать технологию, позволяющую увеличить долговечность хребтовой балки с её адаптацией в систему планово-предупредительных ремонтов пассажирского вагона.

**Объектом исследования** являются пассажирские вагоны моделей 61-828, 61-425 и 61-4186.

**Предметом исследования** являются хребтовые балки пассажирских вагонов моделей 61-828 и 61-425.

**Методология и методы исследования.** В теоретической части рассмотрения проблемы использованы фундаментные положения науки в части оценки остаточного ресурса подвижного состава, работы металлических элементов конструкций вагона под напряжением и воздействием внешней среды, изучено воздействие лакокрасочного покрытия на долговечность элементов конструкции рамы вагона, произведены расчёты напряжений конструкции рамы пассажирского вагона с использованием программного комплекса «SCAD office» методом конечных элементов при нормативных [96] и минимально допустимых толщин элементов рамы вагона [95], в конструкцию которой входит хребтовая балка. В практической части проведены исследования элементов вновь изготовленной хребтовой балки и хребтовых балок вагонов моделей 61-828 и 61-425, выработавших нормативных срок службы, на наличие в них остаточных напряжений в зависимости от глубины травления металла, проведено металлографическое исследование элементов хребтовых балок, исследованы процессы, возникающие в структуре металла из-за некачественного снятия ранее нанесенного лакокрасочного покрытия и влияние на локальных участках хребтовой балки многослойного покрытия, рассмотрено состояние качества очистки и подготовки под покраску хребтовой балки по результатам дробеструйной обработки, а также развитие коррозии на поверхности металла необработанного и после проведения дробеструйной обработки, произведен расчет циклической долговечности рамы пассажирского вагона, выработавшего предельный нормативный срок службы.

Проведена экспериментальная очистка хребтовой балки дробеструйным и механическим способами с последующим нанесением лакокрасочных материалов на хребтовую балку вагона модели 61-4186.

**Положения, выносимые на защиту**

1 предложения по снятию остаточных напряжений в хребтовой балке, возникающих при приварке концевых, промежуточных и шкворневых балок;

2 предложения по применению лакокрасочного покрытия с улучшенными защитными свойствами от коррозионного и воздействия внешних факторов;

3 предложения по оценке влияния дробеструйной обработки поверхностного слоя хребтовой балки на развитие коррозии.

#### **Научная новизна работы** заключается в следующем:

1 доказано, что металл основного объёма хребтовой балки после достижения предельного срока службы (40 лет) отвечает всем техническим и прочностным требованиям в соответствии с ЛВ1.0031 РК. Вагоны пассажирские. Руководство по капитальному ремонту (КР-1);

2 определена топография локальных участков хребтовой балки, подверженных в процессе эксплуатации усиленной коррозии, вследствие которой происходит утонение сечения ниже требуемой предельной величины;

3 выявлены причины наибольшей интенсивности коррозии на локальных участках хребтовой балки, которые обусловлены наличием значительного разброса остаточных напряжений в её поверхностных слоях, образующихся в процессе изготовления вагона;

4 разработана технология, устраняющая негативное формирование остаточных напряжений в поверхностных слоях хребтовой балки и тем самым увеличивающая её коррозионную стойкость.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1 основной объём хребтовой балки после нормативного срока эксплуатации (40 лет) отвечает всем требованиям нормативной документации;

2 на основании экспериментальных исследований установлено, что наиболее подверженными коррозионным воздействиям в хребтовой балке являются места сварных соединений со шкворневыми балками;



3 рассчитанное напряжённо-деформированное состояние пассажирского вагона при нормативной толщине сечений металлоконструкций соответствует нормативным параметрам, а напряжённо-деформированное состояние с заложенными в конструкцию минимально допустимыми сечениями превышает допустимые параметры в элементах хребтовой балки;

4 разработана технология нанесения лакокрасочного покрытия на хребтовую балку и экипажную часть вагона. Предложено лакокрасочное покрытие с улучшенными защитными от внешнего и коррозионного воздействия свойствами;

5 полученная в результате работы программная модель исследования хребтовой балки целесообразна для распространения на другие основные элементы экипажной части вагона (детали рамы и кузова вагона). Применение данной модели на других элементах подвагонного оборудования позволит обеспечить снижение коррозионного воздействия на экипажную конструкцию подвижного состава в целом, а также увеличит выявляемость зарождающихся дефектов при проведении планового ремонта;

6 применение технологии дробеструйной обработки с последующей окраской хребтовой балки способствует повышению безопасности пассажирского вагона, прошедшего планово-предупредительный ремонт, в части повышения коррозионной стойкости несущих элементов конструкции вагона.

**Реализация достигнутых результатов.** Отдельные разделы экспериментальных и теоретических исследований использованы в научных отчётах и протоколах испытаний пассажирских вагонных депо Орехово-Зуево, Москва-3, ЗАО НО «ТИВ», в научно-исследовательских работах ОАО «ТВЗ» [67, 75, 95, 96, 136, 141, 145].

**Достоверность** научных положений и выводов основываются на сопоставлении теоретических результатов с экспериментальными, методологически обоснованными исследованиями, проведёнными с

применением поверенного и аттестованного в установленном порядке испытательного оборудования и приборов, использованием современных средств регистрации контролируемых параметров.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях в Брянском государственном техническом университете, на VI Международной научно-практической конференции «Менеджмент качества, транспортная информационная безопасность, информационные технологии», Ярославль 6–10 сентября 2021 г.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в пяти печатных работах, из них в рецензируемых научных изданиях 3 работы и 1 работа в издании, входящем в международную базу цитирования Scopus. [53, 54, 146, 147, 149].

**Структура и объём работы.** Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и выводов.

Объём работы составляет 187 листов. Список литературы включает 149 источников. Работа иллюстрирована 79 рисунками, 35 таблицами, приложением.

# 1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА

## 1.1 Продолжительность жизненного цикла пассажирского вагона

В целях реализации Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. [123] поставлена задача обеспечения потребности в пассажирских перевозках на период массовых перевозок, которые становятся все более и более востребованными, однако за последние 10 лет парк пассажирских вагонов уменьшился с 29 113 до 18 438, поэтому обеспечить покрытие требуемого количества вагонов можно только за счёт продления срока службы существующих, что позволит обеспечить объёмные показатели перевозок на период создания новых современных вагонов.

Для покрытия данных потребностей формируются программы проведения капитально-восстановительного ремонта пассажирских вагонов, которые сосредоточены на следующих структурных предприятиях – пассажирских вагонных депо Орехово-Зуево, Великие Луки, а также на Тамбовском и Воронежском вагоностроительных заводах.

Кроме обеспечения пассажирских перевозок в дальнем следовании в настоящее время популярность набирают стилизованные туристические перевозки и уже осуществляются такие туристические туры, как «Карелия»: Москва – Петрозаводск – Сортавала – Выборг – Москва, «Сочи»: Туапсе – Сочи – Гагра. Однако для погружения в атмосферу времени, колорита местности необходимо также провести и внутрисалонные интерьерные модернизационные работы в вагонах, которые будут закреплены для курсирования только в данных направлениях. Использование пассажирского подвижного состава как для обеспечения перевозок в дальнем сообщении, так и для туристического сегмента является не временной, одномоментной мерой, а фундаментальным решением, продиктованным рыночными потребностями.

Различные собственники осуществляют пассажирские, почтовые, багажные и туристические перевозки. В настоящее время организованы перевозки в направлении Крымского полуострова, Москвы и Санкт-Петербурга АО «Гранд Сервис Экспресс»; туристические перевозки в стилизованном поезде «Золотой Орел» осуществляет «АрктикТрансСервис». Также перевозки груза и багажа осуществляют такие собственники, как Желдорэкспедиция, Трансмобильность, Почта России и другие. В настоящее время более 400 организаций и индивидуальных предпринимателей являются собственниками подвижного состава.

И именно собственник подвижного состава, в первую очередь, заинтересован в обеспечении и поддержании вагонов в технически исправном состоянии, проведении своевременного и качественного ремонта и вправе рассчитывать на эксплуатацию своего подвижного состава сверх назначенного срока службы с получением дополнительной прибыли за счёт снижения инвестиционной нагрузки.

Уместно провести аналогию с собственниками другого железнодорожного подвижного состава (моторвагонного, метровагонного) или автотранспортных средств, в которых отсутствует требование к нормативному сроку службы либо определена процедура его продления. Так, в ОАО «РЖД» на определенные модели и типы железнодорожного подвижного состава существует процедура продления срока службы без проведения КВР или КРМ. При этом критериями для прекращения эксплуатации железнодорожного подвижного состава являются либо сверхнормативные коррозионные или механические износы и повреждения в несущих конструкциях, либо чрезмерное снижение эффективности использования самого вагона [19, 21, 61, 83].

Учитывая количество и разновидность выявляемых в эксплуатации дефектов в несущих металлических элементах пассажирских вагонов, для их исключения необходимо продолжать совершенствовать методы оценки и способы улучшения защиты от внешних факторов и коррозионных

воздействий, обеспечивая повышение долговечности и надежности подвижного состава [20, 97, 109, 146].

В настоящее время в Российской Федерации действует система планового-предупредительного ремонта вагонов. Порядок проведения регламентирован правилами технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [107] и Техническим регламентом таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава» (ТР ТС 001/2011) [127], а периодичность и объёмы ремонта для различных типов пассажирских вагонов установлены Приказом министра путей сообщения РФ № 9Ц от 4 апреля 1997 г. «О введении новой системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов» [105] и приказом Минтранса Российской Федерации

№ 15 от 13 января 2011 г. «О внесении изменений в приказ Министерства путей сообщения Российской Федерации от 4 апреля 1997 г. № 9Ц» [106]. Порядок технического обслуживания, ремонта железнодорожного подвижного состава и его составных частей определяется конструкторской, ремонтной и эксплуатационной документацией [127].

По истечении назначенного срока службы вагона, как после изготовления, если он не проходил капитально-восстановительный ремонт (КВР) [14], так и после проведения КВР и/или КРМ, эксплуатация вагона в соответствии с нормативными требованиями должна быть прекращена независимо от его технического состояния, после чего принимается решение о списании вагона из инвентарного парка [48, 134, 136]. Аналогичная процедура о прекращении эксплуатации вагонов существует после истечения вновь назначенного срока службы вагонам, прошедшим процедуру продления срока службы при КВР или КРМ, исключение составляет специальный железнодорожный подвижной состав, где допускается процедура продления назначенного срока службы определённых моделей [103].

Таким образом, в соответствии с требованиями приказа № 15 от 13 января 2011 г. [106] на рисунках 1.1–1.8 приведены виды и периодичность технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов.

На рисунке 1.1 приведены периодичность и сроки ремонта цельнометаллических пассажирских вагонов, используемых в пассажирских перевозках (вагоны с колесными парами с роликовыми/кассетными подшипниками) следующих типов – мягкие, СВ, РИЦ (курсирующие во внутрироссийском сообщении), купейные, некупейные, межобластные с установленным сроком службы 28 лет (до 1994 года постройки).

Постройка	ТО-3	ТО-3	ДР	ТО-3	ТО-3	КР-1 (1)
по сроку	1 год	2 года	3 года	4 года (1 год)	5 лет (1 год)	6 лет
по пробегу	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	500 т.км/ 600 т.км	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	-
Постройка	КР-1 (1)	КР-1 (2)	КР-2 (КРМ)	КР-1 (1)	КВР/ Списание	
по сроку	6 лет	12 лет (6 лет)	20 лет	26 лет (6 лет)	28 лет	
по пробегу	-	-	-	-	-	
КВР	ТО-3	ТО-3	ДР	ТО-3	ТО-3	КР-1 (1)
по сроку	29 лет (1 год)	30 лет (1 год)	31 год (3 года)	32 года (1 год)	33 года (1 год)	34 года (6 лет)
по пробегу	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	500 т.км/ 600 т.км	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	-
КВР	ТО-3	ТО-3	ДР	ТО-3	ТО-3	Списание
по сроку	35 лет (1 год)	36 лет (1 год)	37 лет (3 года)	38 лет (1 год)	39 лет (1 год)	40 лет
по пробегу	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	500 т.км/ 600 т.км	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	-

**Рисунок 1.1 – Периодичность и сроки проведения технического обслуживания и ремонта цельнометаллических пассажирских вагонов до 1994 года постройки**

На рисунке 1.2 приведены периодичность и сроки проведения технического обслуживания и ремонта цельнометаллических пассажирских вагонов, используемых в пассажирских перевозках (вагоны с колесными парами с роликовыми/кассетными подшипниками) следующих типов – мягкие, СВ, РИЦ (курсирующие во внутрироссийском сообщении), купейные, некупейные (плацкартные), межобластные с установленным сроком службы 28 лет (после 1994 года постройки).

Постройка	ТО-3	ТО-3	ДР	ТО-3	ТО-3	КР-1 (1)
по сроку	1 год	2 года	3 года	4 года (1 год)	5 лет (1 год)	6 лет
по пробегу	250 т.км / 300 т.км	250 т.км / 300 т.км	500 т.км / 600 т.км	250 т.км / 300 т.км	250 т.км / 300 т.км	-

Постройка	КР-1 (1)	КР-1 (2)	КР-2 (КРМ)	КР-1 (1)	ДР	КВР / Списание
по сроку	6 лет	12 лет (6 лет)	18 лет	23 года (5 лет)	26 лет (3 года)	28 лет
по пробегу	-	-	-	-	500 т.км / 600 т.км	-

КВР	ТО-3	ТО-3	ДР	ТО-3	ТО-3	КР-1 (1)
по сроку	29 лет (1 год)	30 лет (1 год)	31 год (3 года)	32 года (1 год)	33 года (1 год)	34 года (6 лет)
по пробегу	250 т.км / 300 т.км	250 т.км / 300 т.км	500 т.км / 600 т.км	250 т.км / 300 т.км	250 т.км / 300 т.км	-

КВР	ТО-3	ТО-3	ДР	ТО-3	ТО-3	Списание
по сроку	35 лет (1 год)	36 лет (1 год)	37 лет (3 года)	38 лет (1 год)	39 лет (1 год)	40 лет
по пробегу	250 т.км / 300 т.км	250 т.км / 300 т.км	500 т.км / 600 т.км	250 т.км / 300 т.км	250 т.км / 300 т.км	-

**Рисунок 1.2 – Периодичность и сроки проведения технического обслуживания и ремонта цельнометаллических пассажирских вагонов после 1994 года постройки**

На рисунке 1.3 приведены периодичность и сроки проведения технического обслуживания и ремонта цельнометаллических пассажирских вагонов с назначенным сроком 40 лет (вагоны с колесными парами с роликовыми/кассетными подшипниками).

Постройка	ТО-3	ТО-3	ДР	ТО-3	ТО-3	ДР	ТО-3	КР-1 (1)
по сроку	1 год	2 года (1 год)	3 года	4 года (1 год)	5 лет (1 год)	6 лет (3 года)	7 лет (1 год)	8 лет
по пробегу	250 т.км / 300 т.км	250 т.км / 300 т.км	500 т.км / 600 т.км	250 т.км / 300 т.км	250 т.км / 300 т.км	500 т.км / 600 т.км	250 т.км / 300 т.км	-

Постройка	КР-1 (1)	КР-1 (2)	КР-2 (КРМ)	КР-1 (1)	КР-1 (2)
по сроку	8 лет	14 лет (6 лет)	20 лет	28 лет (8 лет)	34 года (6 лет)
по пробегу	-	-	-	-	-

Постройка	ТО-3	ТО-3	ДР	ТО-3	ТО-3	Списание
по сроку	35 лет (1 год)	36 лет (1 год)	37 лет (3 года)	38 лет (1 год)	39 лет (1 год)	40 лет
по пробегу	250 т.км / 300 т.км	250 т.км / 300 т.км	500 т.км / 600 т.км	250 т.км / 300 т.км	250 т.км / 300 т.км	-

**Рисунок 1.3 – Периодичность и сроки проведения технического обслуживания и ремонта цельнометаллических пассажирских вагонов с назначенным сроком 40 лет**



На рисунке 1.4 приведены периодичность и сроки проведения технического обслуживания и ремонта вагонов-ресторанов всех модификаций (вагоны с колесными парами с роликовыми/кассетными подшипниками).

Постройка	ТО-3	ТО-3	ДР	ТО-3	КР-1 (1)
по сроку	1 год	2 года (1 год)	3 года	4 года (1 год)	5 лет
по пробегу	250 т.км / 300 т.км	250 т.км / 300 т.км	500 т.км / 600 т.км	250 т.км / 300 т.км	-
Постройка	КР-1 (1)	КР-1 (2)	КР-2 (КРМ)	КР-1 (1)	КВР
по сроку	5 лет	10 лет (5 лет)	15 лет	20 лет (5 лет)	25 лет
по пробегу	-	-	-	-	-
КВР	КР-1 (1)		КР-1 (2)	Списание	
по сроку	30 лет (5 лет)		35 лет (5 лет)	40 лет	
по пробегу	-				

**Рисунок 1.4 – Периодичность и сроки проведения технического обслуживания и ремонта вагонов-ресторанов всех модификаций**

На рисунке 1.5 приведены периодичность и сроки проведения технического обслуживания и ремонта вагонов габарита РИЦ, эксплуатируемых в международном сообщении.

Постройка	ТО-3	ДР	ТО-3	ДР	ТО-3	ДР
по сроку	6 мес.	1 год	1,5 года (6 мес.)	2 года (1 год)	2,5 года (6 мес.)	3 года (1 год)
Постройка	ТО-3	ДР	ТО-3	ДР	ТО-3	КР-1 (1)
по сроку	3,5 года (6 мес.)	4 года (1 год)	4,5 года (6 мес.)	5 лет (1 год)	5,5 лет (6 мес.)	6 лет
Постройка	КР-1 (1)	КР-1 (2)	КР-2 (КРМ)	КР-1 (1)	КВР	
по сроку	6 лет	12 лет (6 лет)	18 лет	23 года (5 лет)	28 лет	
КВР	КР-1 (1)		Списание			
по сроку	34 лет (6 лет)		40 лет			

**Рисунок 1.5 – Периодичность и сроки проведения технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов, эксплуатируемых в международном сообщении**

На рисунке 1.6 приведены периодичность и сроки проведения технического обслуживания и ремонта багажных и почтово-багажных вагонов всех модификаций (вагоны с колесными парами с роликовыми/кассетными подшипниками) до 1994 года изготовления.



Постройка	ТО-3	ДР	ТО-3	ДР	ТО-3	КР-1 (1)
по сроку	1 год	2 года	3 года (1 год)	4 года (2 года)	5 лет (1 год)	6 лет
по пробегу	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	500 т.км/ 600 т.км	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	-

Постройка	КР-1 (1)	КР-1 (2)	КР-2 (КРМ)	КР-1 (1)	КВР/ Списание
по сроку	6 лет	12 лет (6 лет)	20 лет	26 лет (6 лет)	28 лет
по пробегу	-	-	-	-	-

КВР	ТО-3	ТО-3	ДР	ТО-3	ТО-3	КР-1 (1)
по сроку	29 лет (1 год)	30 лет (1 год)	31 год (3 года)	32 года (1 год)	33 года (1 год)	34 года (6 лет)
по пробегу	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	500 т.км/ 600 т.км	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	-

КВР	ТО-3	ТО-3	ДР	ТО-3	ТО-3	Списание
по сроку	35 лет (1 год)	36 лет (1 год)	37 лет (3 года)	38 лет (1 год)	39 лет (1 год)	40 лет
по пробегу	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	500 т.км/ 600 т.км	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	-

**Рисунок 1.6 – Периодичность и сроки проведения технического обслуживания и ремонта почтово-багажных вагонов всех модификаций до 1994 года изготовления**

На рисунке 1.7 приведены периодичность и сроки проведения технического обслуживания и ремонта багажных и почтово-багажных вагонов всех модификаций (вагоны с колесными парами с роликовыми/кассетными подшипниками) после 1994 года изготовления.

Постройка	ТО-3	ДР	ТО-3	ДР	ТО-3	КР-1 (1)
по сроку	1 год	2 года	3 года (1 год)	4 года (2 года)	5 лет (1 год)	6 лет
по пробегу	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	500 т.км/ 600 т.км	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	-

Постройка	КР-1 (1)	КР-1 (2)	КР-2 (КРМ)	КР-1 (1)	ДР	КВР/ Списание
по сроку	6 лет	12 лет (6 лет)	18 лет	23 года (5 лет)	26 лет (3 года)	28 лет
по пробегу	-	-	-	-	500 т.км/ 600 т.км	-

КВР	ТО-3	ТО-3	ДР	ТО-3	ТО-3	КР-1 (1)
по сроку	29 лет (1 год)	30 лет (1 год)	31 год (3 года)	32 года (1 год)	33 года (1 год)	34 года (6 лет)
по пробегу	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	500 т.км/ 600 т.км	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	-

КВР	ТО-3	ТО-3	ДР	ТО-3	ТО-3	Списание
по сроку	35 лет (1 год)	36 лет (1 год)	37 лет (3 года)	38 лет (1 год)	39 лет (1 год)	40 лет
по пробегу	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	500 т.км/ 600 т.км	250 т.км/ 300 т.км	250 т.км/ 300 т.км	-

**Рисунок 1.7 – Периодичность и сроки проведения технического обслуживания и ремонта почтово-багажных вагонов всех модификаций после 1994 года изготовления**

На рисунке 1.8 приведены периодичность и сроки проведения технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов, эксплуатирующихся со скоростями 141–200 км/ч.

Постройка	ТО-3	ТО-3	ТО-3	ДР	ТО-3	ТО-3	ТО-3	ДР
по сроку	6 мес.	1 год (6 мес.)	1,5 года (6 мес.)	2 года	2,5 года (6 мес.)	3 года (6 мес.)	3,5 года (6 мес.)	4 года (2года)
по пробегу	150 т.км / 150 т.км	150 т.км / 150 т.км.	150 т.км / 150 т.км	300 т.км / 300 т.км	150 т.км / 150 т.км	150 т.км / 150 т.км.	150 т.км / 150 т.км	300 т.км / 300 т.км
	Постройка	ТО-3	ТО-3	ТО-3	ТО-3	ТО-3	ТО-3	КР-1 (1)
	по сроку	4,5 года (6 мес.)	5 лет (6 мес.)	5,5 лет (6 мес.)	6 лет			
	по пробегу	150 т.км / 150 т.км	150 т.км / 150 т.км.	150 т.км / 150 т.км	-			
Постройка	КР-1 (1)	КР-1 (2)	КР-2 (КРМ)	КР-1 (1)	КР-1 (2)			
по сроку	6 лет	11 лет (5 лет)	16 лет	21 лет (5 лет)	26 лет (5 лет)			
по пробегу	-	-	-	-	-			
Постройка	ТО-3	ТО-3	ТО-3	Списание				
по сроку	26,5 лет (6 мес.)	27 лет (6 мес.)	27,5 лет (6 мес.)	28 лет				
по пробегу	150 т.км / 150 т.км	150 т.км / 150 т.км	150 т.км / 150 т.км	-				

**Рисунок 1.8 – Периодичность и сроки проведения технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов, эксплуатирующихся со скоростями 141–200 км/ч**

При такой системе планово-предупредительного ремонта невозможно учесть в полной мере техническое состояние металлоконструкции кузова каждого вагона в отдельности, а также определить для каждой подвижной единицы оптимальное время проведения планово-предупредительного ремонта [126, 130].

Также в соответствии с существующей системой планово-предупредительного ремонта срок службы вагону назначается без учёта показателей динамической и усталостной прочности металлоконструкции, что зачастую приводит к необоснованно уменьшенному объёму проведения ремонта, а также снижает период безопасной эксплуатации отремонтированного вагона в зависимости от полигона и условий курирования [12, 13, 113, 130].

Таким образом, совершенствование методов, обеспечивающих повышение продолжительности жизненного цикла пассажирского вагона на основе увеличения долговечности его основных элементов (в том числе хребтовой балки), является актуальным.

## **1.2 Система технического обслуживания и планового вида ремонта пассажирских вагонов**

Железнодорожный транспорт является ключевым видом транспорта, осуществляющим перевозку грузов и пассажиров. Для эффективного управления железнодорожной транспортной отрасли необходимо совершенствовать отечественное вагоностроение. Наиболее перспективным в этом направлении является развитие инженерной мысли в пассажирском комплексе, в связи с тем, что совершенствование вагонов грузового типа упирается в технические ограничения по величине предельной осевой нагрузки на колесную пару и рельс соответственно [20, 87, 111]. Не только производство новых вагонов является приоритетным направлением для развития вагоностроения, но и совершенствование парка вагонов при увеличении срока их службы является одним из ключевых аспектов. В настоящее время современные пассажирские вагоны, как правило, имеют увеличенный срок службы, составляющий 40 лет. При этом в эксплуатации на сегодняшний день преобладающее количество пассажирских вагонов имеет назначенный срок службы 28 лет [21, 48, 54, 87, 111]. В связи с этим возникает острая необходимость продления сроков службы существующего пассажирского подвижного состава за счёт ремонтных и модернизационных работ.

В процессе жизненного цикла пассажирский вагон получает ряд процедур технического обслуживания и планового-предупредительного ремонта в следующих объёмах:

–ТО-1 – это комплекс работ по осмотру и обслуживанию вагонов в сформированных поездах на пунктах технического обслуживания (ПТО) станций формирования или оборота перед каждым отправлением в рейс;

– ТО-2 – сезонное техническое обслуживание вагонов перед началом летних и зимних перевозок. Сроки проведения ТО-2 в весенний период установлены с 15 марта по 25 мая, а в осенний период – с 5 сентября по 31 октября. Техническое обслуживание в объеме ТО-2 проводится для всех вагонов, которые планируется использовать в период массовых летних и зимних перевозок. Пассажирским вагонам, проходящим в установленный период плановые виды ремонта в объёме деповского и капитального ремонтов и техническое обслуживание в объеме ТО-3 в период с 1 марта по 25 мая и в период с 20 августа по 31 октября, а также новым вагонам отдельно ТО-2 не проводится, так как все регламентные работы, заложенные в ТО-2, проводятся при ТО-3 и плановых видах ремонта;

– текущий ремонт вагонов ТР – подразделяется на два вида: текущий безотцепочный ремонт (ТБР), который производится без отцепки вагона от состава поезда. ТБР выполняется при проведении ТО-1, и текущий отцепочный ремонт (ТОР), выполняемый с отцепкой вагонов от сформированных поездов в пунктах формирования, оборота, а также транзитных ПТО с подачей на специализированные ремонтные пути;

– ТО-3 – единая техническая ревизия основных узлов и деталей вагона, производится с отцепкой от состава поезда на специализированных ремонтных путях;

– ДР – ремонт, выполняемый для восстановления исправности и частичного восстановления ресурса вагона с заменой или ремонтом деталей и узлов;

– КР-1 – плановый ремонт вагонов для восстановления исправности и ресурса вагона путем замены или ремонта изношенных и повреждённых узлов и деталей, а также их модернизации [16];

– КР-2 – плановый ремонт вагонов для восстановления исправности и ресурса вагона с частичным вскрытием кузова до металла, сопровождающийся заменой электропроводки и теплоизоляции и при необходимости заменой базовых элементов конструкций и модернизацией основных узлов [15];

– КРМ – ремонт пассажирских вагонов с контролем всех несущих элементов конструкции с восстановлением их ресурса, замену при необходимости его составных частей, включая базовые, и проведения комплекса работ по модернизации вагона, включая обновление внутреннего оборудования и интерьера [102];

– КВР – ремонт пассажирских вагонов с использованием восстановленных существующих конструкций кузовов и тележек, обновлением внутреннего оборудования и созданием современного интерьера [14].

### **1.3 Анализ оценки остаточного ресурса несущих элементов кузова пассажирского вагона и способов его продления**

В Российской Федерации вопросами оценки остаточного ресурса несущих элементов кузова пассажирского вагона и способов его продления, а также совершенствования технологий улучшения содержания как подвижного состава в целом, так и его основных несущих элементов, и, соответственно, улучшения методов по обеспечению, обслуживанию и ремонту подвижного состава, повышения прочности вагонов занимались и занимаются различные научные коллективы: РУТ (МИИТ), ВНИИЖТ, ЗАО НО «ТИВ», ПКБТ Л и ряд других научно-технических, научно-производственных объединений, организаций, институтов и университетов.

Капитально-восстановительный ремонт пассажирского подвижного состава на территории Российской Федерации выполняют следующие предприятия: вагоноремонтные заводы Тамбов и Воронеж, пассажирские

вагонные депо Орехово-Зуево, Великие Луки, а также вагоноремонтные заводы Минск и Гомель (Республика Беларусь). Среди разработок в научной сфере, посвящённых организации капитально-восстановительного ремонта, обслуживания и ремонта, оценке прочности пассажирских вагонов, а также их узлов и деталей, следует отметить вклады А.А. Битюцкого, В.И. Киреева, К.И. Николаева, А.М. Орловой, М.С. Соколовского, А.В. Третьякова, Ю.М. Черкашина и многих других [5, 6, 7, 8, 66, 67, 70, 74, 76, 77, 79, 87, 89, 108, 114, 125, 126, 129, 135, 136, 145].

Разработке расчётных конечно-элементных моделей кузовов пассажирских вагонов и совершенствованию различных методов расчёта посвящены исследования Д.Я. Антипина, В.В. Кобищанова, С.Д. Коршунова, В.А. Лебедева, Д.Ю. Расина и других ученых [1, 2, 9, 11, 21, 56, 59, 84, 87, 88, 92, 94, 138, 142].

Среди зарубежных ученых можно отметить Е.П. Блохина, В.К. Гарка, В.Л. Горобца, Р.В. Дуккипати, П.К. Мьяллера, С.В. Мямлина, Д. Норри, Д. Очерхуу, В.В. Папасюка, А.В. Путятю, Дж. Скалли, Ж. Фриз, А.О. Шимановского [3, 22, 86, 90, 97, 98, 99, 115, 121].

Так, в работе Д. Очерхуу [97] при рассмотрении продления сверхнормативного срока службы пассажирских вагонов предлагается формировать математическую модель с исследованием конструкции вагонов методом конечных элементов, а также с проведением неразрушающего контроля, в том числе с использованием метода магнитной памяти.

Огромный вклад в развитие и совершенствование аналитических, а также экспериментальных методов прочностных оценок кузовов пассажирских вагонов внесен учеными Тверского института вагоностроения – Е.В. Афанасьевым, В.П. Богдановым, Д.И. Гончаровым, А.С. Жуковым, С.Л. Самошкиным, А.Н. Скачковым, С.А. Соловьевым, А.А. Юхневским, [12, 16, 34, 48, 73, 74, 78, 95, 96].

Разработки учетных РУТ (МИИТ): А.П. Азовского, В.Н. Котуранова, М.Н. Овечникова, Г.И. Петрова, В.Д. Хусидова, Л.А. Шадура и других [8, 12, 19, 53, 77, 117, 135, 136, 141, 142, 144, 145] посвящены изучению и оценке напряжённо-деформированного состояния на этапе проектирования вагона. Однако в процессе эксплуатации и воздействия на металлоконструкции внешних факторов (коррозионное воздействие окружающей среды, механические воздействия в процессе ремонта) приводят к износу и утонению сечения основных элементов кузова, таким образом, существует необходимость учета изменения их геометрических и прочностных свойств.

В направлении расчёта прочностных характеристик кузовов пассажирских вагонов, связанных с исследованием остаточного ресурса и износа, работали такие учёные, как Н.П. Жук, А.М. Краснобаев, Ю.М. Черкашин и другие [10, 18, 20, 55, 58, 63, 67, 76, 80, 85, 87, 100, 101, 102, 111, 117, 131, 132, 133, 138, 139, 143].

Проблемы влияния возрастной структуры железнодорожного подвижного состава на безопасность движения рассматривались в трудах А.Е. Красновского [79].

Вопросам разработки материалов и технологий, обеспечивающих высокую коррозионную защиту и стойкость от коррозии как вагона в целом, так и его элементов, занимались ученые-коррозионисты В.С. Артамонов, С.Г. Веденкин С.Н. Казарновский, В.С. Синявский [8, 56, 62, 80, 85, 108, 110, 116, 119, 120, 122, 124, 140]. Ими заложены основы к экспериментальному подходу, поиску и разработке конструкционных материалов, лакокрасочных покрытий и средств защиты от коррозионного воздействия на железнодорожный транспорт.

Вопросы защиты металлических элементов от воздействия коррозии путём нанесения лакокрасочного покрытия, снижения темпов коррозионного воздействия на структуру металла, образования коррозионных язв путем установления и применения лакокрасочного и антикоррозионного покрытия

отражены в работах ученых Р.Г. Гаджиевой, Л.Н. Земсковой, В.В. Северного, В.В. Чеботаревского и многих других [57, 62, 93, 122].

Использование материалов с максимальными защитными свойствами всегда будет оправдано технологически, однако не всегда экономически, поэтому процесс защиты металла от коррозионного воздействия необходимо рассматривать комплексно, а именно учитывать влияние процесса окраски на экологию.

Вопросы снижения влияния на окружающую среду при ремонте и изготовлении подвижного состава напрямую связан с повышением затрат. Любой ремонт вагона с полным или частичным снятием защитного лакокрасочного покрытия проводится либо механическим путем, либо с использованием специальных жидкостей для снятия ранее нанесённого лакокрасочного покрытия [128].

Проблемами влияния изготовления, применения и утилизации лакокрасочной продукции на окружающую среду занимались ученые В.М. Ермаков, В.Г. Калыгин [57, 62].

Основополагающие требования к проектированию подвижного состава были заложены в трудах В.И. Кирилова, В.Н. Котуранова, В.В. Лукина, Л.А. Шадура [19, 20, 77, 144, 145].

Ученым В.П. Лобзиневым разработана методика определения оптимальных характеристик несущих элементов рамы и кузовов вагона на основе метода параметрической оптимизации [82].

В работах ученых А.Д. Кочнова, А.М. Красобаева, Ю.М. Черкашина [78] впервые рассмотрены вопросы продления срока службы существующего подвижного состава с целью его использования для обеспечения потребности в грузовых железнодорожных перевозках.

Следует отметить, что вопросам управления индивидуальным ресурсом пассажирских вагонов, долговечности основных элементов конструкции, разработки теории как на этапе проектирования, так в процессе эксплуатации и



проведения планово-предупредительного ремонта уделялось значительно меньшее внимание.

В диссертации С.Д. Коршунова [74] по теме «Совершенствование методов оценки несущей способности и остаточного ресурса кузовов пассажирских вагонов после ремонта» рассмотрены вопросы эксплуатации и состояния подвижного состава пассажирского типа, где установлено, что после 15–20 лет эксплуатации коррозионный износ таких элементов, как нижние кромки, обшивка крыши, толстостенные элементы кузова, достигает до 80 % от толщины обшивки, а площадь коррозионного износа – до 60 %.

Проведенные в процессе рассмотрения расчёты вагонных конструкций методом конечных элементов с применением программного комплекса «SCAD Office» при сгенерировании расчётных схем кузовов пассажирских вагонов моделей 61-425, 47, 61-4179, 61-4465, 61-517 (37СБ) показали, что их прочностные характеристики соответствуют заложенному запасу.

При проведении экспериментальных исследований несущей способности основных конструкций кузовов пассажирских вагонов моделей 61-4179, 61-517 (37 СБ), 61-4447 установлено, что результаты экспериментальных исследований количественно и качественно близки с расчётными и их среднее отклонение составляет не более 20 %.

В диссертации В.Ф. Лапшина [80] на тему «Прогнозирование прочности и долговечности вагонов для перевозки коррозионно-активных грузов» рассматривались вопросы эксплуатации и обслуживания грузовых вагонов-хопперов для перевозки минеральных удобрений, где установлено, что причиной порядка 65 % отказов в работе вагонов являются коррозионные повреждения. При перевозке корродирующих грузов (минеральных удобрений, кислот) изменяется напряжённое состояние грузовых вагонов вследствие уменьшения сечения элементов из-за сильного коррозионного износа. Существующее воздействие химической коррозии приводит к существенному снижению несущей способности и, соответственно, к сокращению

долговечности использования подвижного состава, а также уменьшению его надёжности.

В диссертационной работе В.М. Ермакова [57] по теме «Разработка системы подбора лакокрасочного покрытия пассажирских вагонов с целью повышения их эксплуатационной надёжности» рассматриваются вопросы качества и надёжности лакокрасочного покрытия от коррозионного воздействия и установлено, что лакокрасочное покрытие на алкидной основе, широко используемое в начале XXI века, значительно хуже по защитным и эксплуатационным свойствам, чем лакокрасочное покрытие на основе эпоксидных двухкомпонентных (полиуретановых) окрасочных материалов. При проведении расчётных и экспериментальных исследований установлено, что лакокрасочное покрытие на двухкомпонентной основе в два раза лучше алкидных аналогов, что, в свою очередь, позволяет обеспечивать эффективную защиту металлоконструкции от коррозионного воздействия.

В результате краткого обзора и анализа работ по исследованию прочности и ресурса основных элементов металлоконструкций (рама, хребтовая балка) и пассажирского вагона в целом можно сделать следующие выводы:

1 значительное количество исследований посвящено совершенствованию конструкции подвижного состава, выполнению и совершенствованию технологии его ремонта, прочности, надёжности и динамике кузовов подвижного состава, а также непосредственно выбору параметров кузовов и ходовых частей на стадии изготовления;

2 авторы большинства работ приходят к выводу, что по результатам оценки прочности и остаточного ресурса несущих конструкций целесообразно управлять через индивидуальный остаточный ресурс подвижного состава. Однако в подавляющем количестве работ это касается рассмотрения подвижного состава грузового типа.

Можно констатировать, что вопросами исследования оценки повышения продолжительности жизненного цикла пассажирских вагонов на основе

увеличения долговечности его основных элементов (в том числе хребтовой балки) в опубликованной к настоящему времени научно-технической литературе уделено мало внимания.

Таким образом, работа по совершенствованию методов увеличения долговечности хребтовой балки пассажирского вагона является актуальной и имеет практическую значимость.

#### **1.4 Анализ способов восстановления работоспособности элементов пассажирских вагонов**

Для восстановления работоспособности элементов пассажирских вагонов используются следующие технологические операции:

– проведение планово-предупредительного ремонта. Этот метод наиболее эффективен при осуществлении работ по профилактике выхода из строя оборудования. Так, в процессе проведения планово-предупредительного ремонта осуществляются диагностика и замена комплектующих элементов, подверженных наибольшему износам или требующих их замены в результате выработки нормативного срока;

– техническое обслуживание. Этот метод применяется в период проведения технического обслуживания пассажирского подвижного состава в пунктах формирования/оборота (расформирования) и нацелен на выявление предотказного состояния основных эксплуатационных дефектов;

– текущий ремонт. Этот вид ремонта осуществляется для замены ненормально работающего оборудования ввиду наступления критического состояния из-за гарантийного, эксплуатационного, дегазационного его износа;

– сварка, наплавка, упрочнение и установка износостойких пластин. Данный метод восстановления работоспособности оборудования осуществляется в основном для механических элементов подвижного состава и имеет цель продления срока его работоспособности сверх заложенного на этапе

изготовления эксплуатационного ресурса. Данный метод применяется при ремонте автосцепного оборудования и элементов экипажной части вагонов. Благодаря ему межремонтный пробег пассажирского подвижного состава за последние 50 лет увеличен более чем в 2 раза;

– модернизация узлов и деталей. Данный метод позволяет улучшить технические, эстетические или потребительские качества подвижного состава. Применяется как при проведении планового-предупредительного ремонта, так и при проведении отдельных программ, нацеленных как на повышение надежности подвижного состава, так и на улучшение качества предоставления услуг потребителям;

– ремонт подвижного состава, узлов и деталей в специализированных организациях и центрах. В последнее время изготовители подвижного состава, такие как Siemens, Talgo, Alstom, ТВЗ, осуществляют поставку подвижного состава с последующим осуществлением его обслуживания на протяжении всего назначенного срока службы. Данный метод позволяет заказчику сэкономить бюджетные средства, сосредоточиться на организации непосредственного предоставления услуг потребителю. Для исполнителя обеспечивается взаимодействие изготовитель – эксплуатирующая организация, оперативное решение возникающих вопросов в части надежности подвижного состава, а также работоспособности его узлов и деталей;

– окраска. Данный метод позволяет значительно снизить, а в некоторых случаях исключить влияние на узел или деталь подвижного состава таких факторов, как механическое, климатическое, химическое и/или электрическое воздействие. Кроме того, при окраске узлов, деталей, а также подвижного состава в целом значительно увеличивается его коррозионная защита.

Именно вопросы выбора лакокрасочного покрытия в части защиты элементов подвижного состава от внешних факторов играют первостепенную роль.

## 1.5 Выводы по первому разделу

Исходя из сформулированной цели исследования поставлены следующие задачи:

1 Проанализировать структуру парка пассажирских вагонов, используемых в перевозочной деятельности на территории Российской Федерации и сопредельных государств;

2 Провести оценку состояния элементов хребтовых балок, прошедших полный цикл эксплуатации, на соответствие прочностным характеристикам;

3 Определить участки хребтовой балки, подверженные наибольшему коррозионному воздействию в процессе эксплуатации;

4 Выявить причины локальных коррозионных воздействий и микроразрушений на хребтовую балку в процессе эксплуатации;

5 Разработать технологию, позволяющую увеличить долговечность хребтовой балки с её адаптацией в систему планово-предупредительных ремонтов пассажирского вагона.

## **2 ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ ХРЕБТОВОЙ БАЛКИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА**

### **2.1 Анализ структуры парка пассажирских вагонов, используемых в перевозочной деятельности на территории Российской Федерации и сосредельных государств**

Парк пассажирских вагонов состоит из одноэтажных цельнометаллических вагонов следующих типов: купейные с двухместными купе (СВ), четырёхместными купе (купейные), плацкартные (некупейные), межобластные с местами для сидения, штабные, вагоны-рестораны, вагоны специального назначения (вагоны-буфеты, бары, вагоны пожарных поездов, электростанции, автомобилевозы и т.д.), почтовые, багажные, для курсирования в международном сообщении, сочленённого типа, а также двухэтажных вагонов с двух- и четырёхместными купе, штабными, межобластными с местами для сидения и вагонами-ресторанами [19, 81, 89, 144].

Большинство пассажирских вагонов установлены на двухосные тележки люлочной конструкции моделей КВЗ-ЦНИИ тип 1 и КВЗ-ЦНИИ М тип 1 с колодочной системой торможения; двухэтажные и большинство вагонов последних лет постройки – на тележках безлюлочной конструкции для скоростей движения до 160 км/ч модели 68-4095(6), а также с дисковыми и магниторельсовыми тормозами для скоростей движения до 200 км/ч модели 68-4075(6). Вес пассажирских вагонов не превышает нагрузку 18 т/ось, при этом вес одноэтажных вагонов различных моделей составляет от 36,1 до 68,8 т, двухэтажных – от 64 до 71 т [5, 17, 19, 89, 144].

Во второй половине XIX и начале XX века вагоны изготавливались в основном из малоуглеродистой и низколегированной стали, а в начале второго

десятилетия XX века в основу конструкции вагона легло изготовление из нержавеющей стали, а рамы вагонов – из низколегированной стали 09Г2С [9, 19].

Проведённый анализ парка пассажирских вагонов показал, что в соответствии с данными АСУ ПВ по состоянию на 31 декабря 2010 г. общее количество пассажирских вагонов составляло 29 113 единицы, из них 21 429 вагонов (74 % от общего количества вагонов), в конструкцию рамы которых входит хребтовая балка, и 7 684 вагона (26 % от общего количества вагонов соответственно), в конструкцию рамы которых входит усечённая хребтовая балка (от концевых до шкворневых балок).

По состоянию на 31 декабря 2020 г. общее количество пассажирских вагонов уменьшилось на 36 % (с 29 113 до 18 438 вагонов), однако доля вагонов, в конструкцию рамы которых входит хребтовая балка, возросла с 74 до 86 %, данное соотношение связано прежде всего с тем, что основная часть выпускаемого подвижного состава производится именно с конструкционным решением по наличию хребтовой балки по всей длине вагона. Так, при общем количестве выпущенных вагонов в период с 2016 по 2020 годы в количестве 2 939 доля вагонов с конструкционным решением наличия хребтовой балки составляет 82 %, или 2 420 выпущенных вагонов.

В настоящее время такие типы вагонов, как сидячие, плацкартные, а также для перевозки груза и багажа произведены только с конструкционным решением по наличию хребтовой балки по всей длине вагона.

Данные о структуре и типе парка пассажирских вагонов представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Структура парка пассажирских вагонов

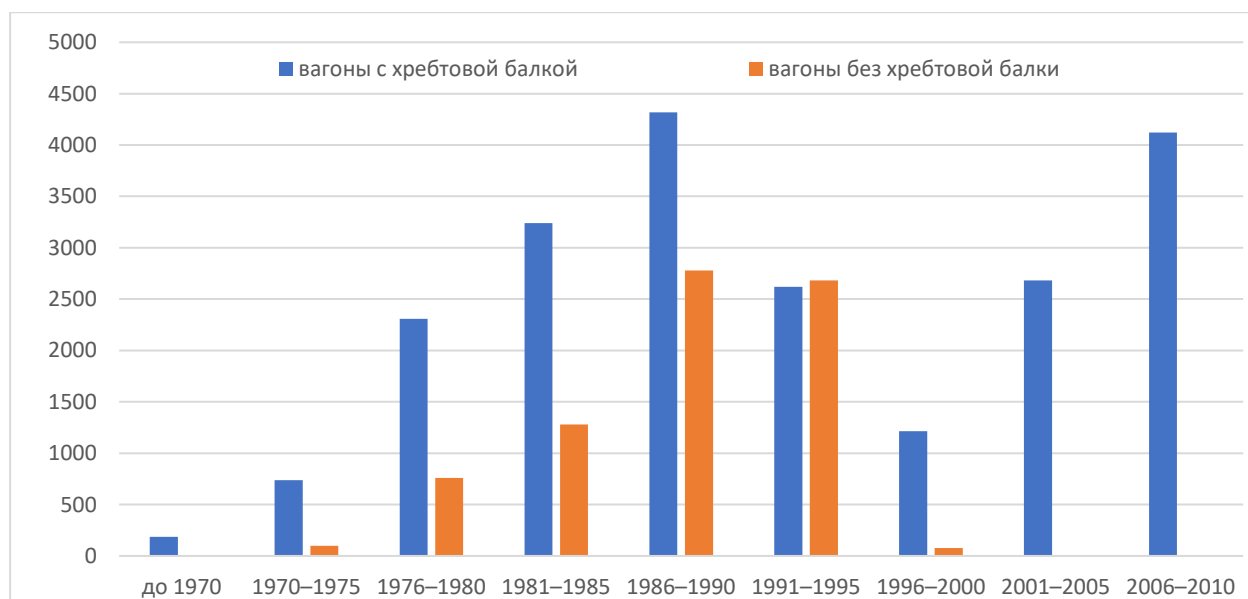
Тип вагона	Всего	с х/б*	без х/б*	Всего	с х/б*	без х/б*	Всего, %	с х/б*, %	без х/б*, %
Плацкартный	9754	9754	0	7204	7204	0	74	74	0
Купейный	9484	4905	4579	6712	5358	1354	71	109	30
Штабной	1348	352	996	1212	615	597	90	175	60
Вагоны класса СВ и люкс	1202	533	669	747	672	75	62	126	11
Багажный	1011	1005	6	1312	1312	0	130	131	0
Почтовый	829	828	1	504	504	0	61	61%	0
Служебно-технический	717	668	49	788	453	335	110	68	68
Сидячий	603	503	100	1180	1180	0	196	235	0
Ресторан	789	129	660	735	201	534	93	156	81
Международный вагон РИЦ	231	0	231	267	267	0	116	0	0
Прочие	3145	2752	393	796	672	124	25	24	32
<b>Всего</b>	<b>29.113</b>	<b>21.429</b>	<b>7684</b>	<b>21.457</b>	<b>18.438</b>	<b>3019</b>	<b>74</b>	<b>86</b>	<b>39</b>
* х/б – хребтовая балка.									

В процессе рассмотрения структуры парка пассажирского подвижного состава немаловажную роль играет и его возраст. По состоянию на 31 декабря 2010 г. средний возраст пассажирских вагонов, в конструкцию которых входит хребтовая балка, составлял 28 лет, а вагонов, в конструкцию которых хребтовая балка не входит, – 22,8 лет, однако на 31 декабря 2020 г. средний возраст пассажирского вагона, в конструкцию вагонов которых входит хребтовая балка, снизился и составил 18 лет, а вагонов, в конструкцию которых хребтовая балка не входит, наоборот, увеличился и составил 29 лет (сравнительный анализ приведен в таблице 2.2, а также на рисунках 2.1 и 2.2).

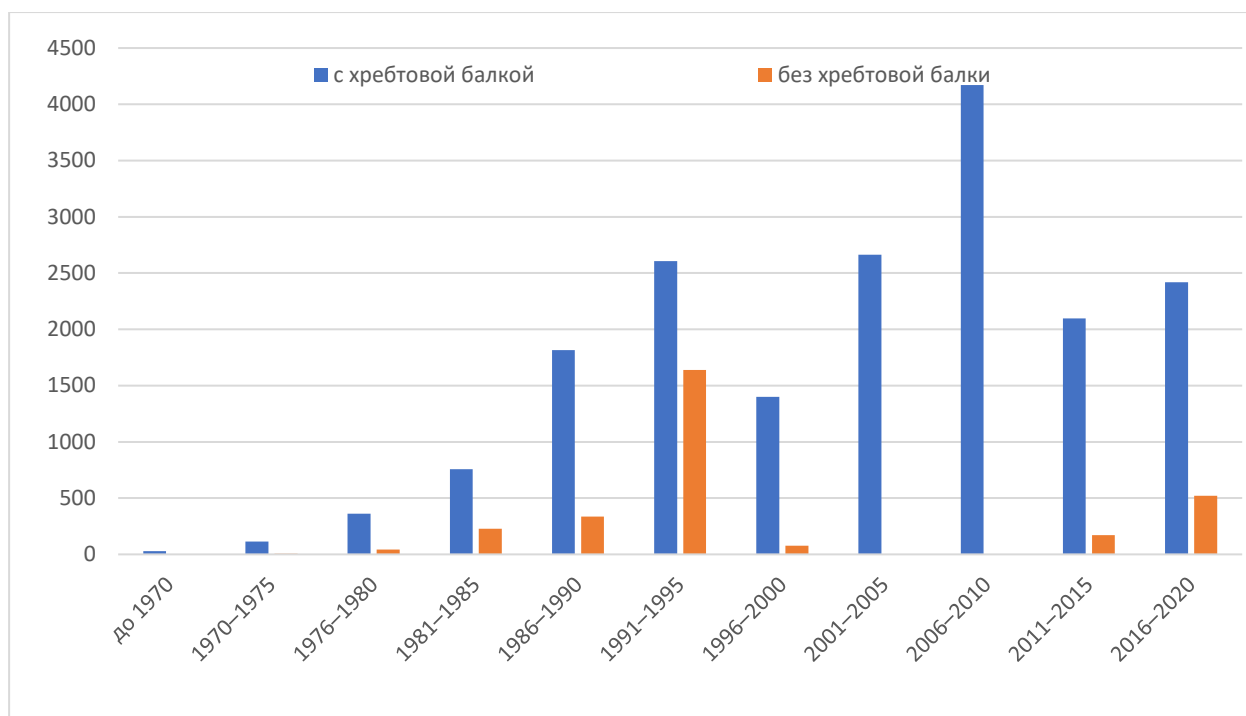


**Таблица 2.2 – Распределение парка подвижного состава в зависимости от конструкции и года изготовления рамы вагона**

Период изготовления вагонов	Парк на 31.12.2010 г				Парк на 31.12.2020 г			
	с х/б	без х/б	Всего	%	с х/б	без х/б	Всего	%
до 1970	186	3	189	98	30	0	30	100
1970–1975	738	100	838	88	113	5	118	96
1976–1980	2309	759	3068	75	363	44	407	89
1981–1985	3239	1279	4518	72	757	227	984	77
1986–1990	4318	2778	7096	61	1816	335	2151	84
1991–1995	2620	2683	5303	49	2607	1640	4247	61
1996–2000	1215	78	1293	94	1399	77	1476	95
2001–2005	2683	1	2684	100	2664	1	2665	100
2006–2010	4121	3	4124	100	4172	0	4172	100
2011–2015	0	0	0	0	2098	170	2268	93
2016–2020	0	0	0	0	2419	520	2939	82
Всего	21429	7684	29113	74	18438	3019	21457	86



**Рисунок 2.1 – Парк пассажирских вагонов в зависимости от их конструкционного изготовления (по состоянию на 31.12.2010 г.)**



**Рисунок 2.2 – Парк пассажирских вагонов в зависимости от их конструкционного изготовления (по состоянию на 31.12.2020 г.)**

Таким образом, по результатам изменения наличного парка пассажирских вагонов (рисунки 2.1, 2.2) с учетом значительного приобретения в последние годы вагонов, в конструкцию рамы которых входит хребтовая балка, вопрос защиты от коррозии и влияния внешних факторов, воздействующих на хребтовую балку в процессе эксплуатации, является актуальным.

## **2.2 Роль хребтовой балки в конструкции и обеспечении долговечности пассажирского вагона**

Хребтовая балка является основным несущим элементом пассажирского вагона. Она участвует в процессе передачи нагрузки от кузова на рельсы в следующей последовательности: кузов вагона – рама – хребтовая балка – шкворневые балки – скользуны надрессорного бруса – центральное подвешивание – рама тележки – буксовое подвешивание – букса – ось колесной пары – колесо – рельс. При оценке технического состояния пассажирского вагона состояние хребтовой балки имеет первостепенное значение. Основными

критериями надёжности хребтовых балок являются: отклонение от плоскостности (пропеллерность), коррозия её элементов, уменьшение площади поперечного сечения, невозможность ремонта в связи с образованием продольных и поперечных трещин в основном сечении металлических профилей [6, 7, 18, 77, 112, 137, 148].

Изготавливаются хребтовые балки пассажирских вагонов отечественных производителей из сталей марки Ст3, 09Г2Д и 09Г2С [36].

Хребтовая балка в процессе эксплуатации пассажирского вагона подвергается статическим и динамическим нагрузкам, вследствие чего при её изготовлении элементы подвергаются расчётам и испытаниям [12, 13], таким как на прочность при соударении, ходовые прочностные испытания, ходовые динамические испытания, полный цикл испытаний на сопротивление усталости, сокращённых испытаний на сопротивление усталости, на несущую способность, а также на ресурс при соударении (циклической и функциональной долговечности) [29, 30, 31, 35, 37, 113].

Рама кузова вагона состоит из хребтовой, двух шкворневых, двух концевых (буферных), промежуточных поперечных и продольных балок. В первых конструкциях ЦМВ хребтовая балка изготавливалась из двутавровых балок № 30 С. Впоследствии для снижения веса вагона двутавры были заменены швеллерами № 30 А сечением 300x85x7,5 мм (вес одного погонного метра двутавра № 30 С составляет 57,4 кг, а швеллера № 30а – 34,4 кг) [6, 7, 18, 38, 77, 112, 137, 148].

С 1962 года конструкция хребтовой балки была изменена. Для увеличения толщины стенок в местах крепления упорных кронштейнов (по концам балок) швеллеры хребтовой балки делали составными из трех частей – по концам на длине 5 м из швеллера № 30 В [36] сечением 300x87x9.5 мм по середине – из швеллера № 30 [39] сечением 300x100x6,5 мм.

Для основных профилей фасонных прокатов в Положении о продлении срока службы пассажирских вагонов, курсирующих в международном

сообщении [103], установлены предельные толщины вертикальных стенок и полок основных прокатных профилей, используемых в конструкциях пассажирских вагонов постройки КВЗ и ЛВСЗ им. И.Е. Егорова (таблица 2.3). В среднем уменьшение толщины вертикальной стенки и полок от номинальных чертёжных размеров варьируется от 20 до 30 % [13, 14, 15, 48].

**Таблица 2.3 – Толщины элементов прокатных профилей хребтовой балки**

Элементы конструкции		Толщина элемента (мм)	
		номинальная	минимально допустимая
Хребтовая балка, консольная часть	Вертикальные стенки	$9,5^{+0,4}_{-0,9}$	7,0
	Полки	$13,5_{-0,8}$	10,0
Хребтовая балка, средняя часть	Вертикальные стенки	$6,5^{+0,3}_{-0,7}$	4,5
	Полки	$11_{-0,7}$	8,0
Боковая продольная балка	Вертикальные стенки	$6,5^{+0,5}_{-1,0}$	4,5
	Полки	$6,5^{+0,5}_{-1,0}$	4,5
Шкворневая балка	Верхний и нижний листы	$10^{+0,3}_{-0,5}$	7,5
	Стенки	$8^{+0,3}_{-0,5}$	6,0
Концевая балка	Вертикальная стенка	$9,5^{+0,4}_{-0,9}$	7,0
	Полки	$13,5_{-0,8}$	10,0
Листы пола хребтовой балки		$2 \pm 0,1$	1,2
Листы нижнего пояса боковой стены хребтовой балки		$2,5 \pm 0,1$	1,5

Проведённый анализ поступающих в плановый ремонт вагонов показал, что 15 % вагонов (плацкартные, межобластные, почтовые, багажные, почтово-багажные и иные) требуют ремонта хребтовой балки в основном из-за наличия на нем коррозионных пятен или коррозионного износа.

При выявлении элементов хребтовой балки со сверхдопустимым горизонтальным или вертикальным прогибом, а также наличии коррозии более 20 % проводится их замена на новые с осуществлением вырубki повреждённых

участков с последующей установкой новых элементов и проваркой сопрягаемых поверхностей сплошным сварочным швом и установкой усиливающей накладки, заходящей на обе стороны сопрягаемых деталей. Эта процедура в соответствии с требованиями ГОСТ 15.902-2014 [26] попадает под понятие «модернизация». В соответствии с требованиями ГОСТ 15.902-2014 [26] в обязательном порядке проводится опытно-конструкторская работа с формированием технического задания, выполняются приёмо-сдаточные, предварительные, приёмочные, квалификационные, сертификационные испытания, а также опытные испытания вагона [13, 14, 15, 26, 31, 48].

Выполнение данного комплекса процедур обусловлен значительным увеличением простоя вагона в ремонте и не даёт гарантии на возможность эксплуатации вагона в дальнейшем без получения положительного заключения по результатам обследования вагона в соответствии с требованиями Положения о продлении срока службы пассажирских вагонов, курсирующих в международном сообщении [103], кроме того, проведение данной процедуры также приводит к значительному удорожанию ремонта самого вагона (примерно на 30 % от стоимости КВР).

Общий анализ состояния пассажирского парка показывает, что все еще остаются незадействованными огромные возможности повышения эффективности использования вагонов на основе внедрения новейших научно-технических разработок, модернизации и улучшения технико-эксплуатационных характеристик. Практическое решение этих вопросов может быть осуществлено на уже существующих производственных мощностях, что в принципиальном плане является гарантией высокой экономической эффективности.

Результаты проведенных осмотров состояния хребтовых балок пассажирских вагонов, попадающих в планово-предупредительный ремонт, показали, что основные повреждения металлоконструкций происходят из-за возникновения очагов и коррозионных язв в несущих элементах вагона. Это

одна из самых распространённых и опасных разновидностей коррозии металлов и сплавов – коррозия, усиленная механическими (статистическими и циклическими) напряжениями. Данный вид разрушения весьма распространён, поскольку подавляющее большинство деталей и конструкций эксплуатируется в агрессивных средах (влажной атмосфере, морской и речной воде, влажных грунтах, среди химических и пищевых производств) [4, 10, 69, 148], но при этом он наименее изучен.

При периодическом нагружении металлов и сплавов в агрессивной среде на поверхности металла образуется большое количество зародышевых трещин, многие из которых перерождаются затем в глубокие, разветвлённые в форме корневой трещины. Металл разрушается от одной из них, самой глубокой.

С целью сохранения и увеличения ресурса использования пассажирского вагона как в процессе его срока службы (40 лет), так и на более длительный период необходимо обеспечить максимальную защиту основного несущего элемента вагона – хребтовой балки от коррозионного воздействия на неё окружающей среды и свести к минимуму развитие коррозии путём её дополнительной обработки.

### **2.3 Существующая нормативно-технологическая документация по техническому обслуживанию и планово-предупредительному ремонту хребтовой балки**

При проведении технического обслуживания пассажирского вагона в объёмах ТО-1, ТО-2, ТО-3 или текущего ремонта в объёмах ТР и ТБР производится визуальный осмотр технического состояния хребтовой балки, в случае выявления видимых осмотрщику вагона трещин в элементах хребтовой балки пассажирский вагон к дальнейшей эксплуатации не допускается.

В соответствии с требованиями Инструкции по сварке и наплавке узлов и деталей при ремонте пассажирских вагонов ЦЛ-201 2019 [60] при всех видах

ремонта разрешается проводить такие работы, как заварка не более двух трещин, переходящих на вертикальную стенку длиной не более 50 % ее сечения; заварка не более двух трещин на одной горизонтальной полке, не переходящих на вертикальную стенку, наплавка поражённых коррозией мест глубиной до 4 мм при капитальном ремонте и до 6 мм при деповском ремонте или усиление их накладками толщиной 8–10 мм; заварка трещин горизонтальной полки и трещин, переходящих на вертикальную стенку, но не более чем на 50 % высоты хребтовой балки и не ближе 200 мм от шкворневой балки, с последующим усилением продольными накладками, усиление накладками в местах расположения упорных угольников протёртостей глубиной более 4 мм при капитальном ремонте и более 5 мм при деповском и текущем ремонтах; заварка и усиление профильной накладкой трещины, горизонтальной полки и трещины, переходящей с горизонтальной полки на вертикальную стенку, но не более чем на 50 % высоты хребтовой балки.

Накладка на хребтовую балку должна быть длиной не менее 0,5 м и устанавливаться симметрично относительно трещины, при необходимости на заклёпки заднего упорного угольника и надпятникового узла и привариваться. Для установки накладки и заварки трещины должна быть вырезана часть вертикального листа шкворневой балки шириной не более 300 мм. После заварки трещины и приварки накладки второй вертикальный лист шкворневой балки должен быть восстановлен приваркой накладки или вваркой вставки.

Ремонтные работы сваркой на раме вагона следует выполнять, предварительно удалив часть пола вагона на участке, прилегающем к дефектному месту хребтовой балки, а также при ремонте внутренней стороны концевой балки и других ответственных элементов рамы вагона так, чтобы обеспечить сварщику свободный доступ при выполнении сварки.

В несущих конструкциях рамы вагонов не допускается применение прерывистых швов как при сварке основных элементов, так и при приварке

деталей к основным элементам, за исключением приварки тонколистовых деталей к элементам жёсткости рамы вагона (например, листы пола и стен).

Соединения конструктивных деталей с основными элементами рамы угловыми швами, как правило, следует выполнять с полной обваркой по контуру деталей.

При ремонте сваркой рамы вагона и других ответственных элементов вагона, имеющих дефекты в виде трещин или несплошностей различной протяженности, необходимо учитывать требования Инструкции [60].

В несущих элементах рамы угловые лобовые швы должны выполняться с плавным переходом к основному металлу. При этом отношение большего катета к меньшему следует принимать равным от 2,0 до 2,5, но не менее 1,5.

При ремонте пассажирских вагонов в объеме КР-1 кроме требований, изложенных в Инструкции [60], с металлическими частями рамы и кузова проводят следующие работы:

- все части рамы очищают от грязи, коррозии и осматривают. Особое внимание обращают на заклёпочные соединения и сварные швы концевых балок, продольных и промежуточных балок, а также места крепления подвагонного оборудования;

- ослабшие заклепки заменяют, сварные швы, имеющие трещины, разделяют механическим способом и заваривают. Дефекты в местах крепления оборудования устраняют;

- прогиб концевых и промежуточных балок более 10 мм в горизонтальном и более 15 мм в вертикальном направлениях устраняется правкой.

При ремонте пассажирских вагонов в объеме КР-2 кроме требований, изложенных в Инструкции [60], при ремонте хребтовой балки проводятся следующие работы:

- очищаются от грязи, коррозии все элементы рамы и осматриваются. При этом особое внимание обращают на заклёпочные соединения и сварные



швы концевых балок, продольных и промежуточных балок, а также места крепления подвагонного оборудования;

– ослабшие заклепки заменяют, сварные швы, имеющие трещины, вырубают и заваривают. Дефекты в местах крепления оборудования устраняют.

При проведении ремонта вагона с модернизацией в соответствии с требованиями Инструкции [16] имеются следующие критерии по браковке и исключению вагона их эксплуатации:

– рамы, имеющие в боковых продольных или хребтовых балках вертикальный прогиб более 200 мм;

– горизонтальный прогиб более 100 мм.

При проведении капитально-восстановительного ремонта вагона кроме требований, изложенных в Инструкции [60], при ремонте хребтовой балки дополнительного проводится следующая работа:

– кузов и раму вагона подвергают техническому диагностированию для принятия решения о возможности продления срока службы.

Для металлических элементов кузова и рамы установлены следующие допустимые проценты износов (механического и коррозионного) в зависимости от толщины:

– не более 10 % толщины для элементов толщиной 1,5–2,0 мм;

– не более 15 % толщины для элементов толщиной 2,5–3,0 мм;

– не более 18 % толщины для элементов толщиной 7,5–8,0 мм;

– не более 20 % толщины для элементов толщиной 9,0–14,0 мм.

Оценку остаточного ресурса базовых элементов кузова и тележек, а также составных частей и деталей вагона выполнять в соответствии с Методическими указаниями по проведению замеров остаточной толщины металлических деталей и узлов технических средств, находящихся на балансе ОАО «РЖД» [91], для определения износа. Вагоны, непригодные и не подлежащие к дальнейшей эксплуатации, подлежат исключению с дальнейшей разделкой и утилизацией.

Определение толщин элементов металлов в закрытых коробчатых и трубчатых сечениях или элементов крупногабаритных металлических конструкций, подвергающихся коррозии, рекомендуется производить ультразвуковым толщиномером с погрешностью измерения не более  $\pm 0,1$  мм в комплекте с преобразователем, обеспечивающим необходимый предел измерений, согласно паспорту на толщиномер.

В соответствии с требованиями руководств по ремонту пассажирских вагонов периодичность окрашивания вагонов приведены на рисунках 2.3–2.6.

Постройка	ДР	КР-1(1)	ДР	КР-1(2)	ДР	КР-2 (КРМ)	ДР
Срок ремонта	3 года	6 лет	9 лет	12 лет	15 лет	18 лет	21 год
Периодичность окраски	Однокомпонентная	Однокомпонентная Двухкомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная Двухкомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная Двухкомпонентная	Однокомпонентная
КР-1(1)	ТО-3	ДР	КВР	ДР	КР-1 (1)	ДР	Списание
23 года	24 года	26 лет	28 лет	31 год	34 года	37 лет	40 лет
Однокомпонентная Двухкомпонентная	Двухкомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная Двухкомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная Двухкомпонентная	Однокомпонентная	

Однокомпонентная – алкидные материалы  
Двухкомпонентная – полиуретановые материалы

**Рисунок. 2.3 – Сроки окраски пассажирских вагонов с назначенным сроком службы 28 лет (с учётом продления на максимально возможный период)**

Постройка	ДР	ДР	КР-1 (1)	ДР	ТО-3	КР-1(2)	ДР
Срок ремонта	3 года	6 лет (3 года)	8 лет	11 лет	12 лет	14 лет	17 лет
Периодичность окраски	Однокомпонентная	Однокомпонентная Двухкомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Двухкомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная
ТО-3	КР-2 (КРМ)	ДР	ДР	КР-1(1)	ДР	ТО-3	КР-1(2)
18 лет	20 лет	23 года	26 лет	28 лет	31 год	32 года	34 года
Двухкомпонентная	Однокомпонентная Двухкомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная Двухкомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Двухкомпонентная	Однокомпонентная
ДР	ТО-3	Списание					
37 лет	38 лет	40 лет					
Однокомпонентная	Двухкомпонентная						

Однокомпонентная – алкидные материалы  
Двухкомпонентная – полиуретановые материалы

**Рисунок 2.4 – Сроки окраски пассажирских вагонов с назначенным сроком службы 40 лет**

Постройка	ДР	КР-1 (1)	ТО-3	ДР	КР-1 (2)	ТО-3	ДР
Срок ремонта	3 года	5 лет	6 лет	8 лет	10 лет	12 лет	13 лет
Периодичность окраски	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Двухкомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Двухкомпонентная	Однокомпонентная
КР-2(КРМ)	ДР	КР-1(1)	ТО-3	ДР	КВР	ДР	КР-1(1)
15 лет	18 лет	20 лет	21 год	23 года	25 лет	28 лет	30 лет
Однокомпонентная Двухкомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Двухкомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная Двухкомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная

ТО-3	ДР	КР-1 (2)	ТО-3	ДР	Списание
31 год	33 года	35 лет	37 лет	38 лет	40 лет
Двухкомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Двухкомпонентная	Однокомпонентная	

Однокомпонентная – алкидные материалы  
Двухкомпонентная – полиуретановые материалы

**Рисунок 2.5 – Сроки окраски вагонов-ресторанов с назначенным сроком службы 25 лет (с учётом продления на максимально возможный период)**

Постройка	ДР	ДР	ДР	ДР	ДР	КР-1 (1)	ДР
Срок ремонта	1 год	2 года	3 года	4 года	5 лет	6 лет	7 лет
Периодичность окраски	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная Двухкомпонентная	Однокомпонентная
ДР	ДР	ДР	ДР	КР-1 (2)	ДР	ДР	ДР
8 лет	9 лет	10 лет	11 лет	12 лет	13 лет	14 лет	15 лет
Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная Двухкомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная
ДР	ДР	КР-2(КРМ)	ДР	ДР	ДР	ДР	КР-1(1)
16 лет	17 лет	18 лет	19 лет	20 лет	21 год	22 года	23 года
Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная Двухкомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная Двухкомпонентная
ДР	ДР	ДР	ДР	КВР	ДР	ДР	ДР
24 года	25 лет	26 лет	27 лет	28 лет	29 лет	30 лет	31 год
Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная Двухкомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная

ДР	ДР	КР-1 (2)	ДР	ДР	ДР	ДР	ДР	Списание
32 года	33 года	34 года	35 лет	36 лет	37 лет	38 лет	39 лет	40 лет
Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная Двухкомпонентная	Однокомпонентная	Однокомпонентная			

Однокомпонентная – алкидные материалы  
Двухкомпонентная – полиуретановые материалы

**Рисунок 2.6 – Сроки окраски пассажирских вагонов, курсирующих со скоростью 141–200 км/ч (с учётом продления до 40 лет)**

При такой системе проведения периодической окраски подвижного состава экипажная часть и хребтовая балка попадают в окраску один раз в 6 лет (при окраске кузова вагона двухкомпонентными материалами), однако защитные свойства лакокрасочного покрытия (ЯРЛИсоат 7130 ЖТ), используемого при окраске экипажной части и хребтовой балки, составляет всего 3 года, таким образом, в период эксплуатации вагонов, окрашенных

двухкомпонентными материалами, воздействие внешних факторов на образование и развитие коррозионных процессов в металлоконструкциях экипажной части значительно выше, чем у вагонов, которым производится периодическая окраска кузова с интервалом 1 раз в три года.

Для повышения надёжности силового каркаса пассажирского вагона, исключения дополнительных издержек и простоя в нерабочем парке для проведения окраски экипажной части, а также повышения защитных свойств лакокрасочного покрытия подвагонного оборудования требуется поиск новых технологий и красок, обеспечивающих надёжную защиту металла от коррозионного и внешнего воздействия на протяжении эксплуатации в межокрашиваемый период.

## **2.4 Выводы по второму разделу**

В результате проведенных исследований по вопросам, связанным с анализом парка, роли хребтовой балки в прочностных характеристиках вагона, а также анализа нормативной документации, установлено:

1 Структура парка пассажирских вагонов, в конструкцию рамы которого входит хребтовая балка, за последнее десятилетие изменилась и увеличилась с 74 до 86 % парка;

2 Хребтовая балка является основным элементом рамы кузова вагона, замену которой в процессе эксплуатации и ремонтов осуществить невозможно;

3 Сверхдопустимые дефекты хребтовых балок, требующие замены элементов, попадают под понятие «модернизация» и требует значительного простоя вагона в ремонте и удорожания;

4 В процессе проведения ремонта хребтовой балки в период жизненного цикла вагона не заложено требование по составу, контролю и нанесению лакокрасочного покрытия;

5 Основные повреждения металлоконструкции хребтовых балок происходят из-за возникновения коррозии в несущих элементах;

6 В соответствии с проведенным анализом конструкторской, нормативной и эксплуатационной документации необходимо привести периодичность и объём выполняемых регламентных ремонтных и окрасочных работ с корректировкой нормативной базы.

### 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА И РАЗРУШЕНИЯ ХРЕБТОВОЙ БАЛКИ В ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА

#### 3.1 Анализ напряжённо-деформированного состояния несущих элементов рамы вагона и хребтовой балки при изготовлении и при максимально допустимых коррозионных износах

Для формирования расчёта конструкции плацкартного вагона методом конечных элементов необходимо осуществить построение геометрической модели по следующим этапам [134]:

- построение геометрической модели и её разбиение на конечные элементы. Определение действующих нагрузок и граничных условий. Формирование конечно-элементной модели;
- расчёт для каждого конечного элемента матрицы жёсткости и вектора приведённой к узлам внешней нагрузки;
- формирование разрешающей системы линейных уравнений;
- решение полученной системы, определение перемещений, деформаций, напряжений;
- оценка прочности конструкции.

При формировании первого этапа осуществим построение геометрической модели прочности конструкции с разбиением на конечные элементы с использованием формулы Коши и закона Гука, начиная с матричной формы:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial}{\partial x} u + \theta v \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_y = \theta u + \frac{\partial}{\partial y} v \quad (3.2)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial}{\partial y} u + \frac{\partial}{\partial x} v. \quad (3.3)$$

где  $\varepsilon$  – вектор деформации вдоль координатных осей,

$u$  – удельная потенциальная энергия деформации,

$\partial$  – угол поворота,

$v$  – скорость,

$\Theta$  – относительная объемная деформация,

$\gamma$  – угловые деформации вдоль соответствующей координатной оси.

Вектор деформации  $\{\mathcal{E}\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$ , вектор перемещений  $\{q\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix}$ ,

дифференцирующая матрица  $L = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}$ . Тогда формулы Коши для плоского

состояния примут вид

$$\{\mathcal{E}\} = [L]\{q\} \quad (3.4)$$

для плоского напряжённого состояния:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y) + \alpha T, \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x) + \alpha T, \quad (3.6)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (3.7)$$

где  $E$  – модуль упругости,

$\sigma$  – напряжение вдоль соответствующей координатной оси,

$\mu$  – коэффициент Пуассона,

$\alpha$  – коэффициент линейного расширения,

$T$  – температура,

$G$  – модуль сдвига.

При умножении уравнения  $\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x) + \alpha T$  на  $\mu$  и сложении с  $\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y) + \alpha T$  получим:

$$\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y - \mu^2\sigma_x) - \alpha T - \mu\alpha T, \quad (3.8)$$

откуда

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y) - \frac{E}{1 - \mu^2}(\alpha T + \mu\alpha T). \quad (3.9)$$

Аналогично можно получить

$$\sigma_y = \frac{E}{1 - \mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x) - \frac{E}{1 - \mu^2}(\alpha T + \mu\alpha T) \quad (3.10)$$

Также

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} = \frac{E}{2(1 + \mu)}\gamma_{xy} = \frac{E}{(1 - \mu^2)}\frac{1 - \mu}{2}\gamma_{xy} \quad (3.11)$$

Переведём 3.9–3.11 в матричную форму:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1 - \mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \mu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} - \frac{E}{1 - \mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \mu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha T \\ \alpha T \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (3.12)$$

или

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} - [D]\{\varepsilon_t\} \quad (3.13)$$

Для формирования условия предела конечных элементов разбиваем вагон на  $n_s$  конечных элементов, связанных между собой в  $n_r$  узлах, и введём для элемента  $p$  локальную систему координат  $O^p X^p Y^p$ .

В этой системе вектор перемещений узла  $i$ -го элемента  $p$  составит:

$$\{q_i^p\} = \begin{Bmatrix} u_i^p \\ v_i^p \end{Bmatrix}. \text{ Соответственно векторы перемещений узла } j - \{q_j^p\}, \text{ узла } k - \{q_k^p\}.$$

$$\text{Вектор узловых перемещений всего элемента } p - \{q^p\} = \begin{Bmatrix} q_i^p \\ q_j^p \\ q_k^p \end{Bmatrix}.$$

Вектор реакций в узле  $i$ -го элемента  $p$ :

$$\{N_i^p\} = \begin{Bmatrix} N_{xi}^p \\ N_{yi}^p \end{Bmatrix}. \text{ Соответственно векторы реакции узла } j - \{N_j^p\}, \text{ узла } k - \{N_k^p\}.$$



Вектор узловых перемещений всего элемента  $p - \{N^p\} = \begin{pmatrix} N_i^p \\ N_j^p \\ N_k^p \end{pmatrix}$ .

На элемент действует объёмная нагрузка  $\{P_V^p\} = \begin{pmatrix} P_{xV}^p \\ P_{yV}^p \end{pmatrix}$  и поверхностная нагрузка  $\{P_S^p\} = \begin{pmatrix} P_{xS}^p \\ P_{yS}^p \end{pmatrix}$ . После приведения её узлам элемента на узел  $i$ -го

элемента  $p$  будет действовать внешняя нагрузка  $\{Q_i^p\} = \begin{pmatrix} Q_{xi}^p \\ Q_{yi}^p \end{pmatrix}$ , соответственно

векторы нагрузок на узел  $j - \{Q_j^p\}$ , узла  $k - \{Q_k^p\}$ . Вектор приведённой нагрузки

на весь элемент  $p - \{Q^p\} = \begin{pmatrix} Q_i^p \\ Q_j^p \\ Q_k^p \end{pmatrix}$ .

Согласно теории упругости

$$\{N^p\} = [K^p]\{q^p\} + \{Q^p\}. \quad (3.14)$$

Для определения матрицы жёсткости примем закон перемещения внутри элемента  $p$ . Он должен определять перемещения  $\{q_c^p\}$  в любой точке  $C$  элемента, если известны его координаты и вектор узловых перемещений  $\{q^p\}$ . Этот закон представлен в виде матрицы  $[F^p]$ .

$$\{q_c^p\} = [F^p]\{q^p\}. \quad (3.15)$$

Точность вычислений сильно зависит от того, насколько точно совпадает принятый закон с реальным распределением перемещений. Для повышения точности необходимо уменьшать размер элементов. С учетом (3.15) уравнение (3.4) для деформации в точке  $C$  примет вид:

$$\{\mathcal{E}^c\} = [L][F^p]\{q^p\} = [B^p]\{q^p\}. \quad (3.16)$$

Уравнение (3.13) для напряжений в точке  $C$  примет вид:

$$\{\sigma^c\} = [D^p][B^p]\{q^p\} - [D^p]\{\mathcal{E}_t^p\}.$$

Определим потенциальную энергию деформированного элемента. Удельная энергия на единицу объёма составит:

$$W = \int_V W_e dV, \quad (3.17)$$

где:  $W_e$  – удельная потенциальная энергия.

Для плоского напряжённого состояния

$$W_e = \frac{1}{2} (\varepsilon_x \sigma_x + \varepsilon_y \sigma_y + \gamma_{xy} \tau_{xy}) = \frac{1}{2} \{\varepsilon\}^T \{\sigma\}. \quad (3.18)$$

Тогда

$$W = \frac{1}{2} \int_V \frac{1}{2} \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV = \frac{1}{2} \int_V ([B^p]\{q^p\})^T ([D^p][B^p]\{q^p\} - [D^p]\{\varepsilon_t^p\}) dV. \quad (3.19)$$

С учётом  $([B^p]\{q^p\})^T = \{q^p\}^T [B^p]^T$  и того, что вектор узловых перемещений не зависит от положения произвольной точки и его можно вынести за интеграл, получаем:

$$W = \frac{1}{2} \{q^p\}^T \int_V [B^p]^T [D^p] [B^p] dV \{q^p\} - \frac{1}{2} \{q^p\}^T \int_V [B^p]^T [D^p] \{\varepsilon_t^p\} dV. \quad (3.20)$$

Найдём работу узловых реакций, объёмных и поверхностных сил на перемещении элемента:

$$A = \frac{1}{2} \{q^p\}^T [K^p] \{q^p\} + \frac{1}{2} \{q^p\}^T (\{Q^p\} + \int_V [F^p]^T \{P_v^p\} dV + \int_S [F^p]^T \{P_s^p\} dS). \quad (3.21)$$

Подставим в это уравнение вектор реакции из (3.14) и вектор перемещений произвольной точки из (3.15). Получим:

$$A = \frac{1}{2} \{q^p\}^T [k^p] \{q^p\} + \frac{1}{2} \{q^p\}^T (\{Q^p\} + \int_V [F^p]^T \{P_v^p\} dV + \int_S [F^p]^T \{P_s^p\} dS). \quad (3.22)$$

В соответствии с законом сохранения энергии работа равна потенциальной энергии, (3.20) равно (3.22),

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \{q^p\}^T [K^p] \{q^p\} + \frac{1}{2} \{q^p\}^T (\{Q^p\} + \int_V [F^p]^T \{P_s^p\} dS = \\ & = \frac{1}{2} \{q^p\}^T \int_V [B^p]^T [D^p] [B^p] dV \{q^p\} - \frac{1}{2} \{q^p\}^T \int_V [B^p]^T [D^p] \{\varepsilon_t^p\} dV. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Это равенство будет тождественным, если

$$[K^p] = \int_V [B^p]^T [D^p] [B^p] dV, \quad (3.24)$$

$$\{Q^p\} = - \int_V [B^p]^T [D^p] \{\varepsilon_t^p\} dV - \int_V [F^p]^T \{P_v^p\} dV - \int_S [F^p]^T \{P_s^p\} dS. \quad (3.25)$$

Уравнение (3.24) позволяет рассчитать матрицу жесткости элемента.

Для определения приведённой внешней нагрузки необходимо задать несколько условий. Пусть:

$\{Q_t^P\} = - \int_V [B^P]^T [D^P] \{\varepsilon_t^P\} dV$  – приведённые к узлам температурные нагрузки,  
 $\{Q_V^P\} = - \int_V [F^P]^T \{P_V^P\} dV$  – приведённые к узлам объёмные нагрузки,  
 $\{Q_S^P\} = - \int_S [F^P]^T \{P_S^P\} dS$  – приведённые к узлам поверхностные нагрузки.  
 Поскольку  $[B^P]^T$  можно вывести за знак интеграла, получим

$$\begin{aligned} \{Q_t^P\} &= -[B^P]^T [D^P] \{\varepsilon_t^P\} S^P h^P = -[B^P]^T S^P h^P \frac{E^P}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha^P & T^P \\ \alpha^P & T^P \\ 0 & 0 \end{Bmatrix} = \\ &= -S^P h^P \frac{E^P}{1-\mu^2} [B^P]^T \begin{Bmatrix} (1+\mu)\alpha^P T^P \\ (1+\mu)\alpha^P T^P \\ 0 \end{Bmatrix} = -S^P h^P \alpha^P T^P \frac{E^P}{1-\mu^2} [B^P]^T \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} = \\ &= -h^P \alpha^P T^P \frac{E^P}{2(1-\mu)} \begin{Bmatrix} y_j^p - y_k^p \\ x_k^p - x_j^p \\ y_k^p - y_i^p \\ x_i^p - x_k^p \\ y_i^p - y_j^p \\ x_j^p - x_i^p \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Для расчёта объёмной нагрузки умножим  $[F^P]^T$  на  $\{P_V^P\}$

$$[F^P]^T \{P_V^P\} = \begin{Bmatrix} l_i^p P_{xV}^p \\ l_i^p P_{yV}^p \\ l_j^p P_{xV}^p \\ l_j^p P_{yV}^p \\ l_k^p P_{xV}^p \\ l_k^p P_{yV}^p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} l_i^p P_V^p \\ l_j^p P_V^p \\ l_k^p P_V^p \end{Bmatrix} \quad (3.27)$$

Таким образом, объёмная нагрузка складывается из трех приведенных к трем узлам элементов. Нагрузка, приведённая к узлу  $i$ , имеет вид:

$$\{Q_{iV}^P\} = - \int_V l_i^P \{P_V^P\} dV = -h^P \{P_V^P\} \int_S l_i^P dS = -h^P \{P_V^P\} \left( \int_{x_i^P}^{x_k^P} l_i^P dy \right) dx + \int_{x_k^D}^{x_j^P} \left( \int_{\varphi_1}^{\varphi} i_i^P dy \right) dx, \quad (3.28)$$

где:  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – функции, определяющие границы элемента. Это уравнения прямых, которые легко найти по координатам узлов.

При переносе в глобальную систему координат определяются перемещения для узлов  $j$  и  $k$  для элемента в целом:

$$\begin{Bmatrix} q_{gi}^P \\ q_{gj}^P \\ q_{gk}^P \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{xy}^P & 0 & 0 \\ 0 & R_{xy}^P & 0 \\ 0 & 0 & R_{xy}^P \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_i^P \\ q_j^P \\ q_k^P \end{Bmatrix} \quad (3.29)$$

или

$$\{q_g^P\} = [R^P] \{q^P\} \quad (3.30)$$

Аналогично можно получить выражения для перехода в глобальную систему координат для вектора узловых реакций  $\{N_g^P\} = [R^P] \{N^P\}$  и вектора приведённых к узлам нагрузок  $\{Q_g^P\} = [R^P] \{Q^P\}$ . Для получения в глобальной системе координат матрицы жёсткости элемента умножим (3.14) слева на  $[R^P]$ , а одно из слагаемых еще на единичную матрицу.

$$[R^P] \{N^P\} = [R^P] [k^P] [I] \{q^P\} + [R^P] \{Q^P\}, \quad (3.31)$$

$$\{N_g^P\} = [R^P] [K^P] [R^P]^{-1} [R^P] \{q^P\} + \{Q_g^P\}, \quad (3.32)$$

$$\{N_g^P\} = [R^P] [K^P] [R^P]^{-1} \{q_g^P\} + \{Q_g^P\}. \quad (3.33)$$

Таким образом, при переходе в глобальную систему координат матрица жёсткости изменяется следующим образом:  $[k_g^P] = [R^P] [k^P] [R^P]^{-1}$ .

В глобальной системе координат для элемента  $p$  формируется следующее условие  $\{N_g^P\} = [K_g^P] \{q_g^P\} + \{Q_g^P\}$ .

$$\text{Векторы } \{N_g^P\} = \begin{Bmatrix} N_{gi}^P \\ N_{gj}^P \\ N_{gk}^P \end{Bmatrix}, \{Q_g^P\} = \begin{Bmatrix} Q_{gi}^P \\ Q_{gj}^P \\ Q_{gk}^P \end{Bmatrix}. \text{ Тогда}$$

$$\{N_{gi}^P\} = [K_{gi}^P]\{q_{gi}^P\} + \{Q_{gi}^P\}, \quad (3.34)$$

где матрица  $[k_{gi}^P]$  включает строки 1 и 2 матрицы  $[K_g^P]$ . Аналогично  $\{N_{gj}^P\} = [K_{gj}^P]\{q_{gj}^P\} + \{Q_{gj}^P\}$  (матрица  $[k_{gj}^P]$  включает строки 3 и 4 матрицы  $[K_g^P]$ ),  $\{N_{gk}^P\} = [K_{gk}^P]\{q_{gk}^P\} + \{Q_{gk}^P\}$  (матрица  $[k_{gk}^P]$  включает строки 5 и 6 матрицы  $[K_g^P]$ ).

Пусть в узле  $i$  взаимодействуют элементы  $m, n, p$ . Так как сплошность в этом узле не нарушается, уравнение совместимости деформаций имеет вид:  $\{q_i^p\} = \{q_i^n\} = \{q_i^m\} = \{q_i\}$ . С учетом этого уравнение (3.34) примет вид:

$$\{N_{gi}^P\} = [k_{gi}^P] \begin{Bmatrix} q_i \\ q_j \\ q_k \end{Bmatrix} + \{Q_{gi}^P\}. \text{ Разобьём } [K_{gj}^P] \text{ на три квадратные матрицы и}$$

запишем это уравнение в виде  $\{N_{gi}^p\} = [k_{gii}^p]\{q_j\} + [k_{gij}^p]\{q_j\} + [k_{gik}^p]\{q_j\} + \{Q_{gi}^p\}$ . Добавим в это уравнение векторы перемещений всех узлов с коэффициентами  $[N] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ .

$$\begin{aligned} \{N_{gi}^P\} &= [N]\{q_1\} + \dots + [K_{gii}^P]\{q_1\} + \dots + [K_{gij}^P]\{q_1\} + \dots + [K_{gik}^P]\{q_1\} + \dots + \\ &[N]\{q_{n_r}\} + \{Q_{gi}^P\} = [N, \dots, K_{gii}^P, \dots, K_{gij}^P, \dots, K_{gik}^P, \dots, N]\{q\} + \{Q_{gi}^P\} = [T_{gi}^P]\{q\} + \\ &\{Q_{gi}^P\}, \end{aligned} \quad (3.35)$$

где:  $\{q\}$  – вектор перемещений всех узлов.

Разрешающая система формируется на основании условия равновесия конструкции, то есть для любого узла сумма реакций должна быть равна нулю.

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^{p=n_r} \{N_{g1}^p\} &= \sum_{p=1}^{p=n_r} [T_{g1}^p]\{q\} + \sum_{p=1}^{p=n_r} [Q_{g1}^p] = 0; \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{p=1}^{p=n_r} \{N_{gi}^p\} &= \sum_{p=1}^{p=n_r} [T_{gi}^p]\{q\} + \sum_{p=1}^{p=n_r} [Q_{gi}^p] = 0; \\ \dots\dots\dots \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\sum_{p=1}^{p=n_r} \{N_{n_r}^p\} = \sum_{p=1}^{p=n_r} [T_{n_r}^p]\{q\} + \sum_{p=1}^{p=n_r} [Q_{n_r}^p] = 0.$$

Это система  $n_r$  линейных уравнений относительно  $n_r$  неизвестных. В матричной форме  $[K]\{q\} = \{Q\}$ , где  $[K]$  составлена из матриц  $[T_{gi}^p]$ ,



**Таблица 3.1 – Параметры толщины металла в основных несущих элементах кузова вагона при расчете напряжённо-деформированного состояния**

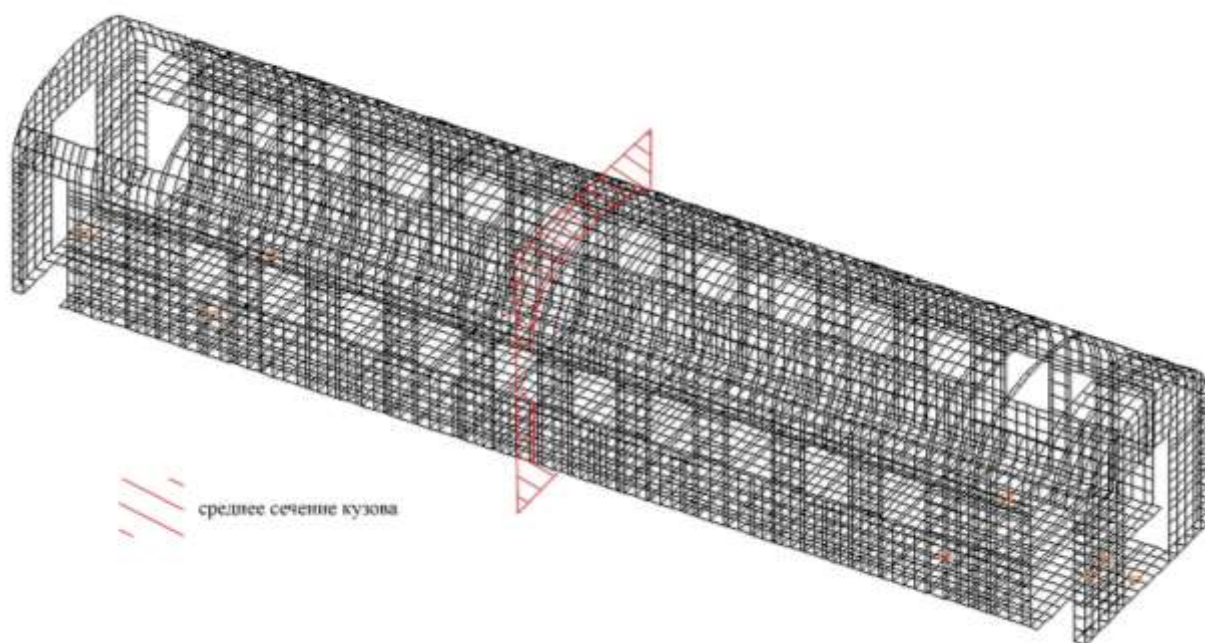
Величина толщины металла	Толщина металла, мм	
	модель 1	модель 2
Горизонтальный лист шкворневой балки	8	5,78
Вертикальный лист шкворневой балки	6	4,2
Обвязка рамы	8	5,78
Поперечная балки рамы (переменное сечение)	4	2,67
Поперечная балки рамы (переменное сечение)	5	3,5
Поперечная балки рамы (переменное сечение)	6	4,2
Омегаобразный гнутый профиль	3	1,8
Гофрированная обшивка пола	2	1,5
Полукруглые гофры	5	3,5
Стойка боковой стены в зонах верхнего и нижнего поясов	3	1,8
Стойка боковой стены в оконной зоне	3	1,8
Боковые стойки дверей	8	5,78
Надооконный и подоконный профиль	2,5	1,5
Обвязка боковых стен	3	1,8
Обшивка верхнего пояса боковых стен	2,5	1,5
Стрингеры	2,5	1,5
Обшивка нижнего пояса	2,5	1,5
Дуги крыши	3	1,8
Обвязка крыши	3	1,8
Обшивка средней части крыши	2	1,2
Полукруглая обшивка средней части крыши	5	3,5
Противоударная стойка	5	3,5
Примечание: модель 1 – номинальные конструкционные толщины; модель 2 – толщины с минимальными параметрами толщины.		

Материал каркаса рамы, противоударных стоек и горизонтального швеллера концевой части крыши – сталь 09Г2С, настил пола в зоне туалетов выполнен из нержавеющей стали, для обшивки и остальных элементов каркаса используется сталь 15 пс. Механические характеристики и допускаемые напряжения материалов приведены в таблице 3.2.

**Таблица 3.2 – Прочностные характеристики и допускаемые напряжения (МПа) для сталей**

Марка стали	$\sigma_{в min}$	$\sigma_m$	$\sigma_{тц}$	I режим	III режим
				[ $\sigma$ ]	[ $\sigma$ ]
AISI 321, EN10088-2- X6GrNiTi 18-10+2В	370	260	238	260	172
09Г2С ГОСТ 19281	480	345	293	345	200
Сталь 15пс ГОСТ 16523	310	205	175	205	144

Закрепление расчётной схемы в пространстве как твёрдого тела (при расчёте по режимам «Норм...» [89]) обеспечивали 4 вертикальные (по оси  $Z$ ) линейные связи на скользянах, 2 продольные линейные связи по оси  $X$  в месте приложения продольной нагрузки (на одном конце рамы), а также 2 дополнительные поперечные линейные связи по оси  $Y$  по концам кузова (рисунки 3.1–3.4).



**Рисунок 3.1 – Расчётная схема МКЭ кузова вагона модели 61-4447.06**



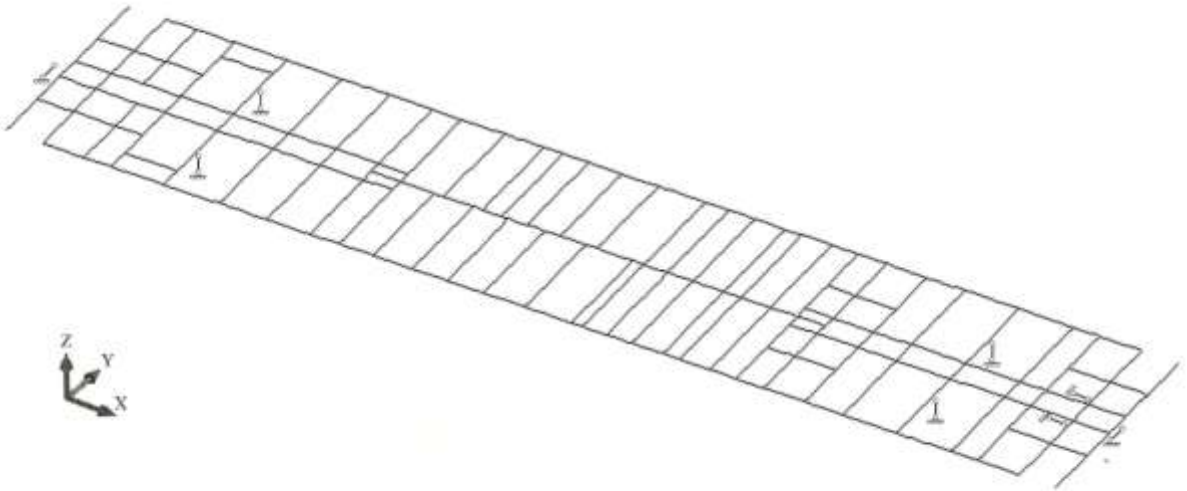


Рисунок 3.2 – Расчётная схема МКЭ рамы вагона модели 61-4447.06

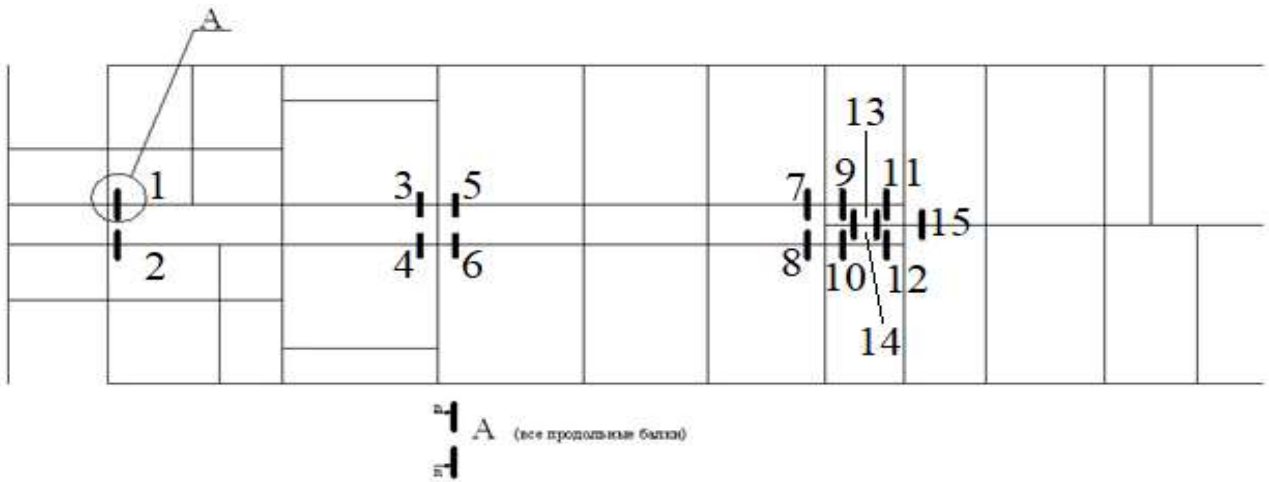


Рисунок 3.3 – Схема рамы (тормозной конец)

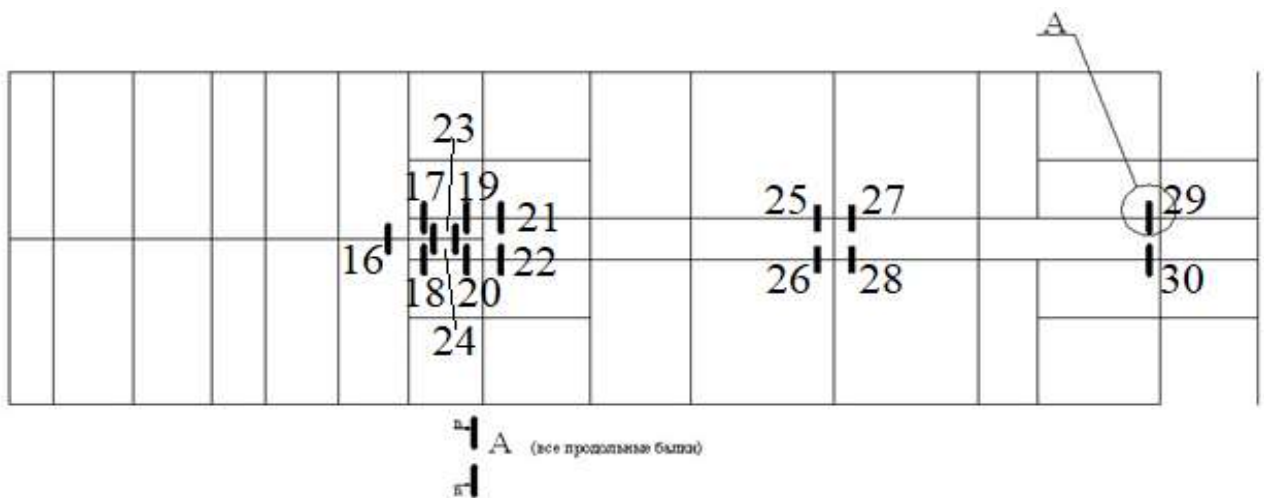


Рисунок 3.4 – Схема рамы (не тормозной конец)

Вертикальная распределённая нагрузка прикладывалась по площади пола, горизонтальной проекции крыши и обвязкам рамы. Вертикальная нагрузка от оборудования, имеющего существенную массу, учитывалась отдельно как узловая. Продольные усилия с присоединённым моментом прикладывалась к передним (растягивающая) или задним (сжимающая) упорным угольникам.

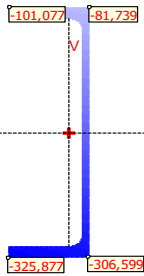
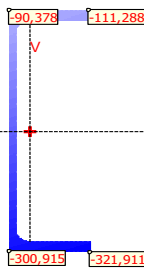
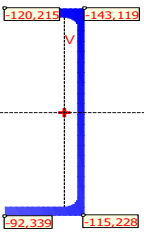
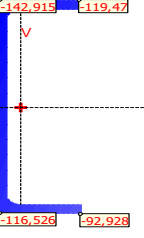
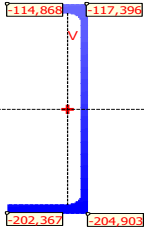
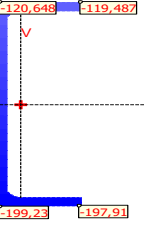
При выполнении расчётов приняты исходные данные плацкартного пассажирского вагона модели 61-4447.06 приведённые в таблице 3.3.

**Таблица 3.3 – Исходные данные плацкартного вагона**

Параметр	Единица измерения	Величина
Длина кузова по концам торцевых стен	м	24,924
Длина кузова по раме	м	24,420
База вагона	м	17,000
Ширина кузова наружная по обвязке рамы	м	3,100
Высота кузова от верха шкворневой балки до верха гофра крыши	м	3,222
Высота оси автосцепки от низа хребтовой балки	м	0,119
Конструкционная скорость	км/ч	160
Коэффициент вертикальной динамики (с учётом влияния боковых сил)	-	0,335
Тара кузова в экипированном состоянии	кг	45 810
Полезная нагрузка	кг	6 500

В результате проведённых испытаний установлено:

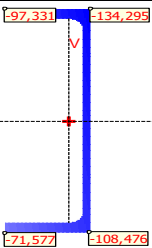
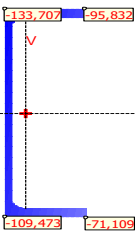
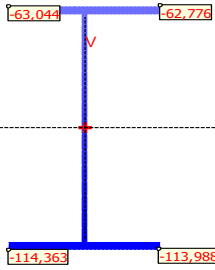
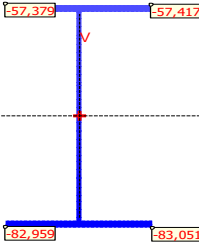
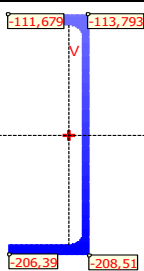
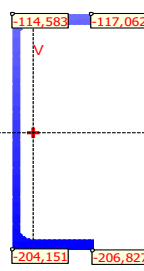
Таблица 3.4. – Результаты напряжённо-деформированного состояния кузова вагона модели 61-4447.06 с нормативными параметрами сечений

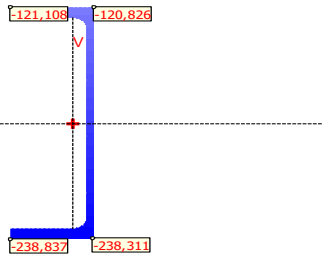
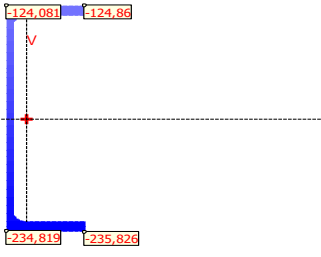
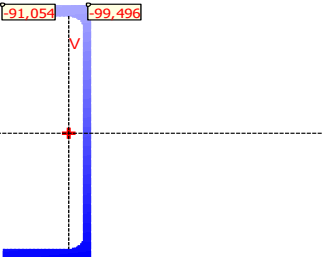
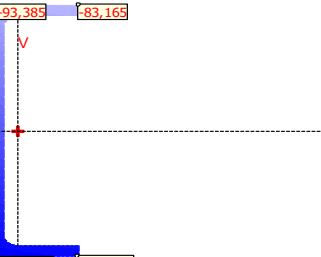
<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-325,877, -81,739) МПа</p> 	<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-321,911, -90,378) МПа</p> 
Сечение хребтовой балки 1-1	Сечение хребтовой балки 2-2
<p>Усилия в сечении: Минимальное = -585,6 Н*мм Максимальное = 45350,4 Н*мм</p>	<p>Усилия в сечении: Минимальное = 635,3 Н*мм Максимальное = 42483,9 Н*мм</p>
$N = -874106,0 \text{ Н}$	$N = -882645,0 \text{ Н}$
<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-143,119, -92,339) МПа</p> 	<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-142,915, -92,928) МПа</p> 
Сечение хребтовой балки 3-3	Сечение хребтовой балки 4-4
<p>Усилия в сечении: Минимальное = -5598,12 Н*мм Максимальное = 705,509 Н*мм</p>	<p>Усилия в сечении: Минимальное = -5304,81 Н*мм Максимальное = -725,843 Н*мм</p>
$N = -540934,0 \text{ Н}$	$N = -542482,0 \text{ Н}$
<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-204,903, -114,868) МПа</p> 	<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-199,23, -119,487) МПа</p> 
Сечение хребтовой балки 5-5	Сечение хребтовой балки 6-6

Усилия в сечении: Минимальное = 72,5 Н*мм Максимальное = 17667,0 Н*мм	Усилия в сечении: Минимальное = -35,9 Н*мм Максимальное = 15833,5 Н*мм
$N = -704079,4 \text{ Н}$	$N = -700501,78 \text{ Н}$
Диапазон значений нормальных напряжений: (-137,837, -101,45) МПа	Диапазон значений нормальных напряжений: (-142,915, -92,93) МПа
Сечение хребтовой балки 7-7	Сечение хребтовой балки 8-8
Усилия в сечении: Минимальное = -4297,5 Н*мм Максимальное = 462,0 Н*мм	Усилия в сечении: Минимальное = -5304,8 Н*мм Максимальное = -725,8 Н*мм
$N = -540934,0 \text{ Н}$	$N = -542483,0 \text{ Н}$
Диапазон значений нормальных напряжений: (-133,637, -69,536) МПа	Диапазон значений нормальных напряжений: (-135,006, -69,026) МПа
Сечение хребтовой балки 9-9	Сечение хребтовой балки 10-10
Усилия в сечении: Минимальное = -1929,54 Н*мм Максимальное = 241,6 Н*мм	Усилия в сечении: Минимальное = -474,7 Н*мм Максимальное = 1951,7 Н*мм
$N = -379195,0 \text{ Н}$	$N = -380312,0 \text{ Н}$

<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-74,618, 7,775) МПа</p>	<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-74,708, 8,029) МПа</p>
Сечение хребтовой балки 11-11	Сечение хребтовой балки 12-12
<p>Усилия в сечении: Минимальное = -5982,8 Н*мм Максимальное = 1616,7 Н*мм</p>	<p>Усилия в сечении: Минимальное = -5855,7 Н*мм Максимальное = -1646,6 Н*мм</p>
$N = -202430,0 \text{ Н}$	$N = -203102,0 \text{ Н}$
<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-43,546, -34,0) МПа</p>	<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-137,264, -62,291) МПа</p>
Сечение хребтовой балки 13-13	Сечение хребтовой балки 14-14
<p>Усилия в сечении: Минимальное = 32,6 Н*мм Максимальное = 2062,8 Н*мм</p>	<p>Усилия в сечении: Минимальное = 16,9 Н*мм Максимальное = 17898,4 Н*мм</p>
$N = -181380,0 \text{ Н}$	$N = -466758,0 \text{ Н}$
<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-192,983, -165,874) МПа</p>	<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-190,43, -134,211) МПа</p>
Сечение хребтовой балки 15-15	Сечение хребтовой балки 16-16

Усилия в сечении: Минимальное = 80,8 Н*мм Максимальное = 5941,3 Н*мм	Усилия в сечении: Минимальное = -15,9 Н*мм Максимальное = 13398,5 Н*мм
$N = -839367,0 \text{ Н}$	$N = -759335,0 \text{ Н}$
Диапазон значений нормальных напряжений: (-88,792, 74,626) МПа	Диапазон значений нормальных напряжений: (-88,589, 74,709) МПа
Сечение хребтовой балки 17-17	Сечение хребтовой балки 18-18
Усилия в сечении: Минимальное = -6978,6 Н*мм Максимальное = 3950,6 Н*мм	Усилия в сечении: Минимальное = -6898,97 Н*мм Максимальное = -3959,0 Н*мм
$N = -167374,0 \text{ Н}$	$N = -167036,0 \text{ Н}$
Диапазон значений нормальных напряжений: (-167,049, -35,128) МПа	Диапазон значений нормальных напряжений: (-166,149, -35,544) МПа
Сечение хребтовой балки 19-19	Сечение хребтовой балки 20-20
Усилия в сечении: Минимальное = -13253,6 Н*мм Максимальное = -2029,2 Н*мм	Усилия в сечении: Минимальное = -13005,5 Н*мм Максимальное = 2026,6 Н*мм
$N = -373568,0 \text{ Н}$	$N = -372597,0 \text{ Н}$

<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-134,295, -71,577) МПа</p> 	<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-133,707, -71,109) МПа</p> 
Сечение хребтовой балки 21-21	Сечение хребтовой балки 22-22
<p>Усилия в сечении: Минимальное = -5158,9 Н*мм Максимальное = 1138,6 Н*мм</p>	<p>Усилия в сечении: Минимальное = -4893,5 Н*мм Максимальное = -1175,3 Н*мм</p>
$N = -490964,0 \text{ Н}$	$N = -489912,0 \text{ Н}$
<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-114,363, -62,776) МПа</p> 	<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-83,051, -57,379) МПа</p> 
Сечение хребтовой балки 23-23	Сечение хребтовой балки 24-24
<p>Усилия в сечении: Минимальное = -9,1 Н*мм Максимальное = 12333,4 Н*мм</p>	<p>Усилия в сечении: Минимальное = 1,3 Н*мм Максимальное = 6160,5 Н*мм</p>
$N = -414326,0 \text{ Н}$	$N = -328466,0 \text{ Н}$
<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-208,51, -111,679) МПа</p> 	<p>Диапазон значений нормальных напряжений: (-206,827, -114,583) МПа</p> 
Сечение хребтовой балки 25-25	Сечение хребтовой балки 26-26

Усилия в сечении: Минимальное = 59,69 Н*мм Максимальное = 19120,7 Н*мм	Усилия в сечении: Минимальное = 76,92 Н*мм Максимальное = 18083,0 Н*мм
$N = -704554,0 \text{ Н}$	$N = -702520,0 \text{ Н}$
Диапазон значений нормальных напряжений: – (–238,837, –120,826) МПа	Диапазон значений нормальных напряжений: (–235,826, –124,081) МПа
	
Сечение хребтовой балки 27-27	Сечение хребтовой балки 28-28
Усилия в сечении: Минимальное = –8,7 Н*мм Максимальное = 23723,7 Н*мм	Усилия в сечении: Минимальное = 24,0 Н*мм Максимальное = 22360,5 Н*мм
$N = -788800,0 \text{ Н}$	$N = -788808,0 \text{ Н}$
Диапазон значений нормальных напряжений: (–303,555, –91,054) МПа	Диапазон значений нормальных напряжений: (–314,764, –83,165) МПа
	
Сечение хребтовой балки 29-29	Сечение хребтовой балки 30-30
Усилия в сечении: Минимальное = 264,8 Н*мм Максимальное = 41082,6 Н*мм	Усилия в сечении: Минимальное = –301,6 Н*мм Максимальное = 44689,3 Н*мм
$N = -874907,0 \text{ Н}$	$N = -883460,0 \text{ Н}$

Расчёты проводились по методу конечных элементов (МКЭ) с использованием проектно-вычислительного комплекса SCAD office при I и III режимах нагружения. В таблице 3.5 приведены линейные деформации кузова, в таблицах 3.5, 3.6 – значения напряжений для некоторых характерных элементов и сечений кузова. Цифра 1 в названии хребтовой балки, обвязок и



прочих элементов обозначает элемент конструкции с меньшей координатой  $Y$  (котловая боковая сторона), 2 – с большей координатой  $Y$  (не котловая сторона).

**Таблица 3.5 – Расчётные деформации в элементах конструкции кузова**

Характерная точка и тип деформации	Значения деформаций, мм		
	I режим	II режим(-)	III режим(+)
Хребтовая балка по оси $X$	14,1	4,7	-9,3
Хребтовая балка (тормозной конец) по оси $Z$	-18,1	-10,0	-6,5
Хребтовая балка (не тормозной конец) по оси $Z$	-17,5	-9,2	-5,3
Середина хребтовой балки по оси $Z$	2,0	-14,4	-29,4
Первая обвязка рамы, середина по оси $Z$	2,9	-5,0	-12,7
Вторая обвязка рамы, середина по оси $Z$	2,5	-5,6	-13,7

На основании полученных результатов выполнен их анализ, который показал значения максимальных нормальных напряжений в элементах каркаса модели вагона (таблица 3.6).

**Таблица 3.6 – Значения максимальных нормальных напряжений ( $\sigma_x$ , МПа) в элементах каркаса рамы**

Наименование элемента конструкции	$\sigma_x$		
	I режим	II режим(-)	III режим(+)
а	б	в	г
Хребтовая балка (двутавр) за консолью (тормозной конец)	-187	-76	84
Хребтовая балка (двутавр) за консолью (не тормозной конец)	-172	-70	86
Хребтовая балка середина (двутавр)	-168	-82	184
Хребтовая балка (швеллер 30 В) за шкворневой (тормозной конец)	-205	-157	75

Продолжение таблицы 3.6

а	б	в	г
Хребтовая балка (швеллер 30 В) за шкворневой (не тормозной конец)	-204	-152	73
Обвязка рамы 1 у шкворневой (тормозной конец)	-233	-111	97
Обвязка рамы 2 у шкворневой (тормозной конец)	-312	-184	-84
Обвязка рамы 1 у шкворневой (не тормозной конец)	-277	-100	102
Обвязка рамы 2 у шкворневой (не тормозной конец)	-277	-107	123
Обвязка рамы 1 середина	-222	-65	117
Обвязка рамы 2 середина	-232	-120	145
Буферный брус (тормозной конец)	-200	156	100
Буферный брус (не тормозной конец)	-192	144	96
Поперечные балки рамы швеллера 300×70×6	116	34	-65
Поперечные балки рамы швеллера 100×60×5	137	-105	-83
Поперечные балки рамы швеллера 100×60×4	233	191	128
Поперечные балки рамы швеллера 14 П	-207	-109	-138
Шкворневая балка (тормозной конец)	134	-118	-126
Шкворневая балка (не тормозной конец)	139	-118	-126

Напряжения в основных несущих элементах каркаса имеют типовой характер. Наиболее нагруженным узлом кузова является рама.

По результатам расчётов при I режиме нагружения в элементах хребтовой балки получены следующие значения максимальных напряжений: в двутавре за переходной зоной тормозного конца  $-187$  МПа, в швеллере за шкворневой балкой тормозного конца  $-205$  МПа, в обвязке рамы у шкворневой балки тормозного конца  $-312$  МПа. В шкворневой балке максимальные напряжения

имеют место на не тормозном конце при I режиме нагружения и равны 139 МПа. Из других поперечных балок максимальные напряжения составляют 116 МПа в шпренгельной балке, 137 МПа в гнутом швеллере 100×60×5, 233 МПа в гнутом швеллере 100×60×4, –207 МПа в швеллере 14 П. При III режиме получены максимальные напряжения (при сжатии) 191 МПа в балке 100×60×4 средней части рамы. Таким образом, в элементах каркаса рамы нормальные напряжения ниже допускаемых, которые равны для I режима 345 МПа, для III режима 200 МПа (195 МПа для шкворневой балки) [89].

На противоположных концах кузова вагона напряжения имеют такой же характер, но на 1-5 МПа меньшие значения по сравнению с представленными выше. На основании проведённого анализа установлено, что в элементах каркаса рамы нормальные напряжения ниже допускаемых [89].

На основании полученных результатов расчётов следует, что изготовленный кузов по прочности удовлетворяет нормативным требованиям.

Таким образом, модель вагона 61-4447.06 с нормативными параметрами основных металлоконструкций плацкартного вагона соответствует нормативным требованиям по несущей способности [89].

При проведении аналогичного моделирования с установлением минимально допустимых толщин силовых параметров металлических элементов рамы вагона и хребтовой балки согласно таблице 3.1 для модели 2 получены результаты, отражённые в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Значения максимальных нормальных напряжений ( $\sigma_x$ , МПа) в элементах каркаса рамы

Наименование элемента конструкции	$\sigma_x$		
	I режим	II режим(-)	III режим(+)
Хребтовая балка (двутавр) за консолью (тормозной конец)	-213	-85	78
Хребтовая балка (двутавр) за консолью (не тормозной конец)	-201	-81	71
Хребтовая балка середина (двутавр)	-218	-102	209
Хребтовая балка (шв. 30 В) за шкворневой (тормозной конец)	-265	-166	83
Хребтовая балка (шв. 30 В) за шкворневой (не тормозной конец)	-234	-164	82
Обвязка рамы 1 у шкворневой (тормозной конец)	-259	-110	103
Обвязка рамы 2 у шкворневой (тормозной конец)	-329	-236	98
Обвязка рамы 1 у шкворневой (не тормозной конец)	-272	-170	96
Обвязка рамы 2 у шкворневой (не тормозной конец)	-270	-198	97
Обвязка рамы 1 середина	-231	-141	176
Обвязка рамы 2 середина	-232	-140	160
Буферный брус (тормозной конец)	-195	137	-95
Буферный брус (не тормозной конец)	-188	131	-93
Поперечные балки рамы шв.300×70×6	-109	41	-90
Поперечные балки рамы шв.100×60×3,5	267	193	-96
Поперечные балки рамы шв.100×60×2,67	228	-251	-253
Поперечные балки рамы шв. 14П	-204	-112	-139
Шкворневая балка (тормозной конец)	181	-165	-190
Шкворневая балка (не тормозной конец)	179	-166	-193

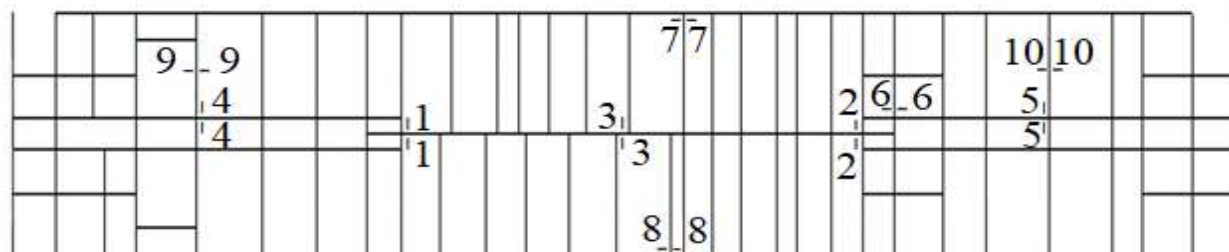
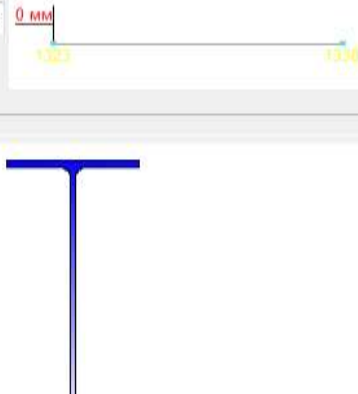
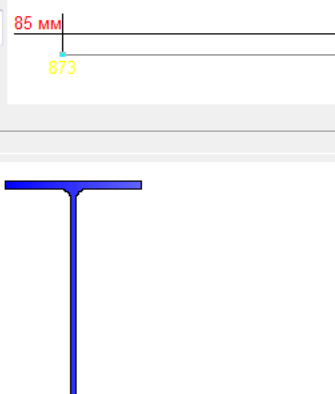
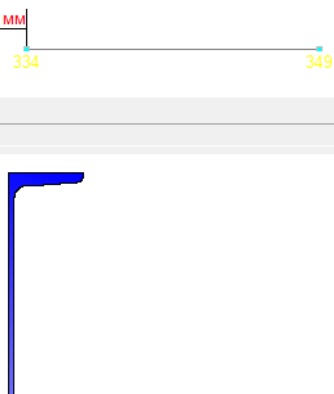
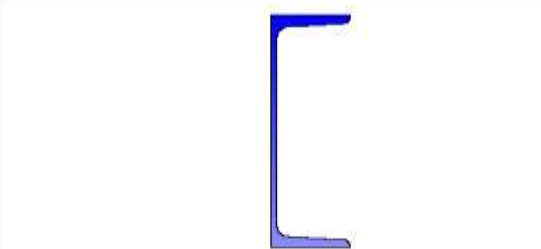
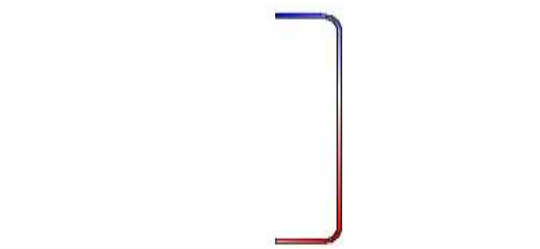
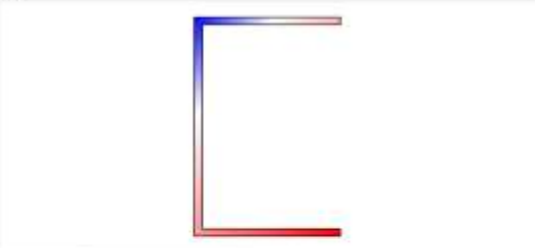
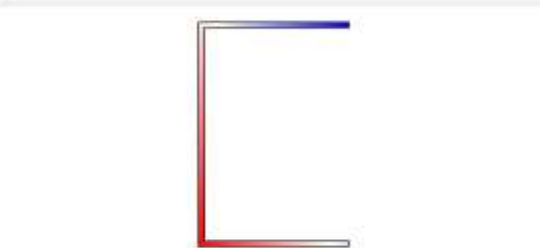

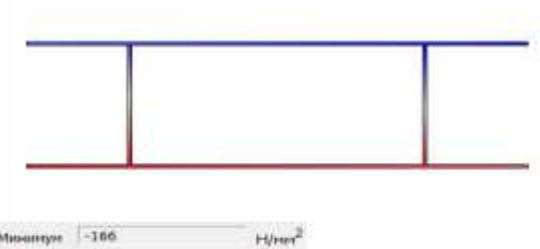


Рисунок 3.5 – Схема рамы и номера расчётных сечений балок

Силовые параметры нагрузок получены согласно проведённым расчётам и приведены в таблице 3.8.

**Таблица 3.8 – Результаты напряжённо-деформированного состояния кузова вагона модели 61-4447.06 с минимально допустимыми параметрами сечений**

<p>Тип поля Нормальные напряжения: 195 мм</p> <p>Номер сечения: 3</p> <p>Загружение: L1</p>  <p>Минимум: -213 Н/мм<sup>2</sup> Максимум: -9 Н/мм<sup>2</sup></p>	<p>Тип поля Нормальные напряжения: 0 мм</p> <p>Номер сечения: 1</p> <p>Загружение: L1</p>  <p>Минимум: -201 Н/мм<sup>2</sup> Максимум: -11 Н/мм<sup>2</sup></p>
Сечение хребтовой балки (1-1)	Сечение хребтовой балки (2-2)
<p>Тип поля Нормальные напряжения: 85 мм</p> <p>Номер сечения: 3</p> <p>Загружение: L1</p>  <p>Минимум: -218 Н/мм<sup>2</sup> Максимум: -131 Н/мм<sup>2</sup></p>	<p>Тип поля Нормальные напряжения: 0 мм</p> <p>Номер сечения: 1</p> <p>Загружение: L1</p>  <p>Минимум: -265 Н/мм<sup>2</sup> Максимум: -131 Н/мм<sup>2</sup></p>
Сечение хребтовой балки (3-3)	Сечение хребтовой балки (4-4)

<p>Тип поля</p> <p>Нормальные напряжения <math>\downarrow</math> 245 мм</p> <p>Номер сечения <math>\downarrow</math> 3</p> <p>Загружение L1</p>  <p>Минимум -234 Н/мм<sup>2</sup></p> <p>Максимум -104 Н/мм<sup>2</sup></p>	<p>Тип поля</p> <p>Нормальные напряжения <math>\downarrow</math> 187.5 мм</p> <p>Номер сечения <math>\downarrow</math> 3</p> <p>Загружение L1</p>  <p>Минимум -109 Н/мм<sup>2</sup></p> <p>Максимум 92 Н/мм<sup>2</sup></p>
Сечение хребтовой балки (5-5)	Сечение шпренгельной балки (6-6)
<p>Тип поля</p> <p>Нормальные напряжения <math>\downarrow</math> 0 мм</p> <p>Номер сечения <math>\downarrow</math> 1</p> <p>Загружение L1</p>  <p>Минимум -89 Н/мм<sup>2</sup></p> <p>Максимум 267 Н/мм<sup>2</sup></p>	<p>Тип поля</p> <p>Нормальные напряжения <math>\downarrow</math> 0 мм</p> <p>Номер сечения <math>\downarrow</math> 1</p> <p>Загружение L1</p>  <p>Минимум -227 Н/мм<sup>2</sup></p> <p>Максимум 228 Н/мм<sup>2</sup></p>
Сечение швеллера 100-60-5 (7-7)	Сечение швеллера 100-60-4 (8-8)
<p>Тип поля</p> <p>Нормальные напряжения <math>\downarrow</math> 0 мм</p> <p>Номер сечения <math>\downarrow</math> 1</p> <p>Загружение L1</p>  <p>Минимум -167 Н/мм<sup>2</sup></p> <p>Максимум 181 Н/мм<sup>2</sup></p>	<p>Тип поля</p> <p>Нормальные напряжения <math>\downarrow</math> 0 мм</p> <p>Номер сечения <math>\downarrow</math> 1</p> <p>Загружение L1</p>  <p>Минимум -166 Н/мм<sup>2</sup></p> <p>Максимум 179 Н/мм<sup>2</sup></p>
Сечение шкворневой балки (9-9)	Сечение шкворневой балки (10-10)

По результатам расчётов при I режиме нагружения в элементах хребтовой балки максимальные напряжения выявлены в следующих элементах: в обвязке

рамы 2 у шкворневой балки тормозного конца –329 МПа, в хребтовой балке (швеллер 30 В) возле шкворневой балки тормозного конца –265 МПа, в обвязке рамы у шкворневой балки не тормозного конца –272 МПа.

При III режиме получены сверхдопустимые напряжения (при сжатии) в обвязке рамы 2 у шкворневой балки тормозного конца 236 МПа и поперечной балки рамы швеллера 100х67х2,67мм 251 МПа. При растягивающих напряжениях III режима получены сверхнормативные напряжения в середине хребтовой балки 209 МПа и поперечной балки рамы швеллера 100х67х2,67 мм 253 МПа.

На основании представленных результатов расчётов сделан вывод, что заложенные параметры максимального коррозионного износа по прочности не удовлетворяют требованиям «Норм...» [89].

При сравнении результатов расчёта двух моделей установлено, что утонение элементов, несущих конструкций вагона, приводит к значительному увеличению напряжений в них, а в таких элементах, как хребтовая и поперечная балки и обвязки рамы, возникают сверхкритичные напряжения.

### **3.2 Оценка состояния вагонов в эксплуатации, определение факторов, влияющих на образование коррозионных дефектов в элементах хребтовой балки пассажирского вагона**

Проведенным анализом в течение длительного времени технического состояния пассажирского подвижного состава, попадающего в плановый ремонт в пассажирские вагонные депо. За период наблюдения в пассажирских вагонных депо Минеральные Воды, Саратов, Орехово-Зуево, Самара, Иркутск, Орёл были обследованы более ста пассажирских вагонов 1991–2010 годов изготовления, курсирующих в различных климатических зонах, а также с различной интенсивностью использования.

В результате анализа установлено, что выявляемые в ходе осмотра дефекты и неисправности подвижного состава целесообразно разделить на 4 критерия:

- эксплуатационные – допущенные в результате внешнего механического воздействия;
- технологические – допущенные в результате нарушения технологии выполнения работ;
- конструкционные – заложенные при изготовлении определённых узлов и деталей;
- деградационные – образованные в основном из-за износа (в том числе коррозионного) элементов подвижного состава.

К эксплуатационным необходимо отнести повреждения в результате влияния на элементы подвагонного оборудования щебня, посторонних предметов, попадающих на экипажную часть подвижного состава при эксплуатации.

К технологическим повреждениям надо отнести дефекты и неисправности, возникшие в результате нарушения технологии ранее проведённого ремонта и обслуживания подвижного состава, приведшие к образованию трещин или непроваров в сварных конструкциях, а также влияние человеческого фактора, связанного с упрощением выполнения технологии или последовательного цикла технологических операций [51, 52].

К конструкционным дефектам относятся неисправности, связанные с некачественным изготовлением металлоконструкции, с металлургическими или скрытыми дефектами, допущенными при изготовлении отдельных узлов и деталей [49, 50, 104].

К деградационным относятся неисправности, возникшие в результате коррозионного износа, или неисправность элементов (деталей) с выработанным нормативным сроком службы [55].



Коррозионным износам наиболее подвержены элементы металлоконструкций (в том числе и связанные с нарушением лакокрасочного покрытия). Наиболее интенсивная коррозия возникает в элементах, где допущено разрушение антикоррозийного покрытия.

Наибольшие коррозионные воздействия (по площади и глубине) наблюдаются в районе приварки к шкворневым и поперечным балкам вагонов с котловой и не котловой сторон вагона (рисунок 3.6).



**Рисунок 3.6 – Пример коррозионных пятен на хребтовой балке вагона модели 61-821**

Наличие коррозионных пятен в указанных местах фиксируется уже в начальный период эксплуатации. С увеличением срока службы вагона происходит рост коррозионных пятен по площади и глубине. При проведении плановых ремонтов эти пятна удаляются механическим путем, однако при дальнейшей эксплуатации дефекты возникают и растут вновь. Такая технология приводит к локальному уменьшению толщины балки, и отмечены случаи сквозной коррозии в этих местах после длительной эксплуатации вагона (рисунок 3.7).



**Рисунок 3.7 – Пример наличия сквозной коррозии хребтовой балки вагона модели 61-825**

Немаловажным фактором предотвращения коррозионного износа пассажирского подвижного состава являются состояние и технология нанесения лакокрасочного покрытия. Так, проведённый мониторинг содержания элементов лакокрасочного покрытия подвагонного оборудования пассажирских вагонов установил многочисленные факты образования адгезии между слоями лакокрасочного покрытия, приводящие к возникновению коррозионного пузыря, а также невыполнение требований технологических операций в части равномерной окраски экипажной части вагонов, нарушения температурного режима окраски и периодичности выдержки времени между окрасочными операциями.

Так, на наличие адгезии между слоями краски указывают следующие основные факторы:

- невыполнение требований руководящих документов [13, 14, 15, 16] в части проведения очистки всех поверхностей от старых лакокрасочных покрытий;
- использование лакокрасочного покрытия, не отвечающего требованиям фактического периода повторного окрашивания вагона, в случае его окраски полиуретановым покрытием;

– нарушение лакокрасочного покрытия в период его эксплуатации (повреждение покрытия щебнем в процессе движения вагона, нарушение лакокрасочного покрытия при поведении текущего ремонта вагона).

Таким образом, лакокрасочное покрытие в данном случае становится не сдерживающим фактором к образованию коррозии, а наоборот, агрессивной средой.

В процессе рассмотрения содержания подвижного состава в эксплуатации, в период попадания вагонов на проведение планового ремонта установлено, что во всех вагонах наблюдается коррозионное воздействие от маленьких очагов непосредственно на элементах несущих конструкций вагона до сквозных язв в элементах обшивки, пола и промежуточных балок.

На примере вагонов моделей 61-4191, 61-4186, 61-836 и 61-826 выявлены следующие состояния лакокрасочного покрытия (рисунки 3.8–3.11):



**Рисунок 3.8 – Коррозионное воздействие на элементы хребтовой балки вагона модели 61-4191**



**Рисунок 3.9 – Коррозионное воздействие на элементы хребтовой балки вагона модели 61-4186**



**Рисунок 3.10 – Состояние экипажной части вагона модели 61-836**



**Рисунок 3.11 – Состояние лакокрасочного покрытия вагона модели 61-826**

Согласно данным базы АСУ ПВ в период с 2010 по 2020 годы по неисправности хребтовых балок забраковано 242 вагона.

Наибольшее количество вагонов выявлено в структурных предприятиях приписки Западно-Сибирского (54), Московского (45) и Уральского (30) филиалов АО «ФПК». Наиболее подверженными являются вагоны плацкартного типа (модели 61-821, 61-826, 61-425), построенные в 1987 (28 вагонов), 1989 (21 вагон) и 1988 (15 вагонов) годах.

В результате рассмотрения неисправности распределились следующим образом:

– коррозионный износ – 150 (62 %),

– локальное повреждение хребтовой балки (в том числе сверхдопустимые износы) – 37 (15 %),

– нарушение технологии ремонта 32 (13 %),

– прочие нарушения – 23 (10 %).

Анализ результатов обследования пассажирских вагонов показал, что основной выявленный в несущих элементах пассажирских вагонов дефект – это коррозионное воздействие, приведшее к разрушению структуры основного металла (хребтовой, шкворневой, концевой и промежуточных балок). Оно выявлено преимущественно на несущих конструкциях вагонов таких моделей, как 61-826, 61-821, 61-425 постройки 1987–1995 гг.

Именно коррозионное воздействие на несущие элементы конструкции вагонов влияет на прочность силовой конструкции вагона в целом. В случае возникновения внештатной или аварийной ситуации конструкция вагона должна играть первостепенную роль в поглощении энергии соударения. Однако даже при относительно небольших скоростях соударения возникают значительные повреждения хребтовых балок пассажирских вагонов. Так, при столкновениях пассажирских вагонов с локомотивами или другими вагонами допущено повреждение основных несущих элементов, в том числе и хребтовой балки вагона модели 61-850 (рисунок 3.12).



**Рисунок 3.12 – Деформация хребтовой балки вагона модели 61-850**



При аналогичном случае допущена деформации хребтовой балки вагона модели 61-4179 (рисунок 3.13).



**Рисунок 3.13 – Деформация хребтовой балки вагона модели 61-4179**

В процессе расследования данных нарушений безопасности движения установлено, что наибольшие деформации хребтовых балок пассажирских вагонов происходят в районе соединения со шкворневой балкой. Также необходимо отметить наличие коррозии на элементах хребтовых балок, где есть многочисленные слои лакокрасочного покрытия.

Следует отметить, что трещинообразованию подвержены и вагоны с минимальным пробегом после изготовления. Так, при техническом обслуживании в 2020 году выявлены трещины на элементах хребтовой балки трех вагонов модели 61.4516 постройки 2019–2020 гг. (рисунок 3.14).



**Рисунок 3.14 – Пример трещины хребтовой балки вагона модели 61.4516**

По результатам проведённых обследований пассажирских вагонов установлено, что все вагоны при попадании в ТОР или планово-предупредительный ремонт имеют значительные нарушения лакокрасочного покрытия хребтовой балки, особенно вагоны моделей 61-826, 61-821 и 61-425 постройки 1987–1995 гг., у которых, кроме нарушения лакокрасочного покрытия, выявлены образования коррозионных язв.

Используемое в настоящее время лакокрасочное покрытие для окрашивания экипажной части пассажирских вагонов из-за отсутствия стойкости к вибрации и температурных воздействий разрушается в межкрасочный период, в результате чего образуются участки с отсутствующим лакокрасочным покрытием (рисунки 3.8–3.10).

Существующая технология подготовки и окраски экипажной части пассажирского вагона не обеспечивает надёжную защиту металла от коррозионного воздействия. Так, на рисунках 3.12 и 3.13 все деформированные участки хребтовых балок имеют значительное наличие коррозии.

### 3.3 Оценка материала хребтовой балки по прочностным параметрам

В целях экспериментального изучения состояния коррозионного влияния на основные прочностные элементы рамы и кузова вагона определена структура металла вагонов, выработавших нормативный срок службы.

Для реализации поставленной задачи на базе ЗАО НО «ТИВ» проведено исследование структуры металла на спектрометре Foundry-Master трёх элементов вырезанных из элементов хребтовых балок с трёх различных вагонов в районе приварки к двутавру шкворневой балки (образец 1 и образец 2 вырезаны из элементов хребтовых балок (швеллеров) вагонов модели 61-828, построенных в 1992 году, образец 3 вырезан из элемента хребтовой балки (швеллера) вагона модели 61-425, построенного в 1980 году).

Вырезка элементов из швеллеров хребтовых балок проводилась на станке гидроабразивной резки Flow Mach 200.

В результате проведённого исследования структура металла всех трех образцов соответствовала марки стали 09Г2Д с массовой долей содержания элементов, приведенных в таблице 3.9.

**Таблица 3.9 – Параметры структуры металла по результатам спектрального анализа**

Наименование материала образца	Номер образца	Массовая доля элементов, %							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
Образец от швеллера	1	0,12	0,45	1,18	0,020	0,020	0,029	0,003	0,03
	2	0,11	0,44	1,19	0,021	0,019	0,028	0,003	0,032
	3	0,12	0,44	1,18	0,021	0,021	0,029	0,003	0,031

Таким образом, по химическому составу данные образцы соответствуют стали марки 09Г2Д.

Следующий этап оценки прочностных показателей элементов хребтовых балок пассажирских вагонов производился на базе ЗАО НО «ТИВ» по следующим методикам – это испытания на изгиб в соответствии с требованиями ГОСТ 14019 – 2003 (ИСО 7438:1985) [25], испытание на ударный



изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах в соответствии с требованиями ГОСТ 9454-78 [43], а также испытания на растяжение в соответствии с требованиями ГОСТ 2497-84 (ИСО 6892-84) [28].

Для проведения испытаний станком гидроабразивной резки Flow Mach 200 вырезано 36 образцов, в том числе 33 образца для контроля предела прочности, временного сопротивления и относительного удлинения. А также 3 образца для контроля склонности к механическому старению на ударный изгиб.

Результаты испытаний приведены в таблицах 3.10–3.12.

**Таблица 3.10 – Результаты испытаний вырезанных элементов швеллера хребтовой балки 1992 года изготовления**

Номер испытания	Наименование материала	Номер образца	Результат испытания							Примечание
			Нагрузка, Н	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	Угол изгиба, градус	
1	Образец от швеллера 1	1	–	460	390	16,0	–	–	–	ГОСТ 2497-84 [28] ГОСТ 14019-2003[25] ГОСТ 9454-78 [43] Образцы 4,5,6 для определения KSU <sup>-20</sup> 300/2/8 Образцы 7,8,9 для определения KSU 300/2/8 Образцы 10, 11, 12 для определения KSU 300/2/8 после механического старения
		2	–	480	400	16,0	–	–	–	
		3	–	–	–	–	–	–	180	
		4	–	–	–	–	–	–	117	
		5	–	–	–	–	–	–	137	
		6	–	–	–	–	–	–	139	
		Среднее значение KSU <sup>-20</sup> (образцы 4, 5, 6)						131	–	
		7	–	–	–	–	–	–	138	
		8	–	–	–	–	–	–	143	
		9	–	–	–	–	–	–	160	
		Среднее значение KSU (образцы 7, 8, 9)						147	–	
		10	–	–	–	–	–	–	153	
	11	–	–	–	–	–	–	139		
	12	–	–	–	–	–	–	154		

		Среднее значение KSU (образцы 10, 11, 12)	149	–	
--	--	--	-----	---	--

**Таблица 3.11 – Результаты испытаний вырезанных элементов швеллера хребтовой балки 1992 года изготовления**

Номер испытания	Наименование материала	Номер образца	Результат испытания							Примечание	
			Нагрузка, Н	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	Угол изгиба, градус		
2	Образец швеллера 2	1	–	440	370	18,5	–	–	–	ГОСТ 2497-84 [28] ГОСТ 14019-2003 [25] ГОСТ 9454-78 [43] Образцы 4,5,6 для определения KSU <sup>-20</sup> 300/2/8 Образцы 7, 8, 9 для определения KSU 300/2/8 Образцы 10, 11, 12 для определения KSU 300/2/8 после механического старения	
		2	–	500	405	20,0	–	–	–		
		3	–	–	–	–	–	–	180		
		4	–	–	–	–	–	–	154		–
		5	–	–	–	–	–	–	150		–
		6	–	–	–	–	–	–	143		–
		Среднее значение KSU <sup>-20</sup> (образцы 4, 5, 6)							149		–
		7	–	–	–	–	–	–	188		–
		8	–	–	–	–	–	–	168		–
		9	–	–	–	–	–	–	168		–
		Среднее значение KSU (образцы 7, 8, 9)							175		–
		10	–	–	–	–	–	–	189		–
		11	–	–	–	–	–	–	189		–
12	–	–	–	–	–	–	205	–			
Среднее значение KSU (образцы 10, 11, 12)							194	–			

**Таблица 3.12 – Результаты испытаний вырезанных элементов швеллера хребтовой балки 1980 года изготовления**

Номер испытания	Наименование материала	Номер образца	Результат испытания							Примечание
			Нагрузка, Н	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	Угол изгиба, градус	
3	Образец от швеллера 3	1	–	495	390	22,0	–	–	–	ГОСТ 2497-84 [28] ГОСТ 14019-2003 [25] ГОСТ 9454-78 [43] Образцы 4,5,6 для определения KSU <sup>-20</sup> 300/2/8 Образцы 7,8,9 для определения KSU 300/2/8 Образцы 10, 11, 12 для определения KSU 300/2/8 после механического старения
		2	–	485	380	23,5	–	–	–	
		3	–	–	–	–	–	–	180	
		4	–	–	–	–	–	145	–	
		5	–	–	–	–	–	157	–	
		6	–	–	–	–	–	151	–	
		Среднее значение KSU <sup>-20</sup> (образцы 4, 5, 6)						151	–	
		7	–	–	–	–	–	179	–	
		8	–	–	–	–	–	173	–	
		9	–	–	–	–	–	162	–	
		Среднее значение KSU (образцы 7, 8, 9)						171	–	
		10	–	–	–	–	–	178	–	
		11	–	–	–	–	–	189	–	
12	–	–	–	–	–	172	–			
Среднее значение KSU (образцы 10, 11, 12)						180	–			

В результате проведённых исследований с оформлением протоколов в соответствии с требованиями ГОСТ 2497-84 (ИСО 6892-84) [28] установлено, что все три вырезанных из швеллеров хребтовых балок вырезанных в районе сварных соединений успешно прошли испытания на соответствие по ударной вязкости, пределу текучести, временному сопротивлению и относительному изгибу.

### 3.4 Топография микроразрушения хребтовой балки в процессе эксплуатации

Наиболее частыми неисправностями рам пассажирских вагонов являются коррозионные повреждения, наличие трещин в элементах рамы кузова, изломов, прогибов балок.

Неисправности в рамах возникают вследствие сходов вагонов с рельс, в результате длительной эксплуатации и при нарушении правил маневровых работ и поездных режимов, а также несоблюдении технологического процесса ремонта. Могут возникать трещины и изгибы, особенно в концевых балках.

Коррозионные повреждения чаще всего появляются из-за плохого качества окраски рам. Наиболее ответственными и повреждаемыми участками в рамах вагонов являются узлы соединений хребтовой балки со шкворневыми балками, места расположения упорных угольников и ударных розеток. Трещины в балках рам можно обнаружить по скоплению в местах их образования валиков из пыли, ржавчины, а в зимнее время – инея. Как правило, изломы балок рам вызывают какие-либо неисправности кузова, которые могут быть признаками неисправности рам вагонов [18, 55, 64].

Не допускаются в эксплуатацию вагоны, в рамах которых обнаружены следующие неисправности:

- трещины, переходящие с горизонтальной полки на вертикальную стенку у шкворневой, хребтовой, боковой продольной и концевой балок;
- трещины в узлах соединения хребтовой балки и шкворневой;
- продольные трещины в любых балках длиной более 300 мм;
- вертикальные или наклонные трещины в любой стенке длиной более 100 мм при измерении по вертикали между их концами;
- трещина любого расположения, если она проходит более чем через одно отверстие для болтов или заклепок;
- обрыв сварного шва в узлах соединения балок;

– трещины или разрывы верхнего или вертикального листа в шкворневой или концевой балках.

Рамы пассажирских вагонов испытывают значительно меньшие нагрузки, чем рамы грузовых вагонов, и если в пунктах оборота и формирования выявляются дефекты в хребтовой балке вагона, то они устраняются в специализированных ремонтных цехах пассажирских вагонных депо.

Перед ремонтом все балки рам, их сварные соединения очищаются от загрязнений, разрушившегося лакокрасочного покрытия, ржавчины. Их техническое состояние подвергают контролю.

Степень поражения коррозией определяют измерением толщины металла балок рам толщиномером или засверловкой отверстий диаметром 8–10 мм в наиболее поражённом месте, а также сравнением результатов замера с чертёжными размерами.

Металлические части рам, поврежденные коррозией не более 20 % площади поперечного сечения при деповском ремонте и 15 % – при капитальном, можно не ремонтировать при условии, что отдельные их стенки и полки повреждены коррозией не более 1/3 номинальной толщины. Балки рам, повреждённые коррозией от 20 до 30 % площади поперечного сечения при деповском ремонте и от 15 до 30 % – при капитальном, ремонтируют сваркой при условии, что их отдельные элементы имеют толщину не менее половины номинальной. Части рам, повреждённые коррозией более чем на 30 % поперечного сечения или имеющие отдельные элементы толщиной менее половины номинальной толщины при длине повреждённых участков более 500 мм, следует заменить. При повреждении балок при длине менее 500 мм разрешается ремонтировать сваркой. Перед выполнением сварочных работ поверхности рам следует зачистить до металлического блеска. Поражённые коррозией балки рам разрешается восстанавливать сплошной наплавкой при длине повреждения до 500 мм, а при большей длине – приваркой накладок толщиной не менее 4 мм [60].

Прогибы балок рам выправляют с применением стенов, домкратов, прессов и растяжек с предварительным местным подогревом деформированного участка при помощи форсунок, работающих на газе или жидком топливе. Например, для правки уширения хребтовой балки в месте установки поглощающего аппарата можно применить гидропресс.

Не допускается прогиб хребтовых, боковых и продольных балок рам грузовых вагонов в горизонтальной и вертикальной плоскости более 50 мм при деповском ремонте и более 25 мм – при капитальном. Если эти балки имеют прогиб в вертикальной плоскости более 200 мм или в горизонтальной более 100 мм, то вагон подлежит исключению из инвентаря. Для шкворневых и концевых балок наибольший допускаемый прогиб не должен превышать 20 мм при деповском ремонте и 10 мм – при капитальном [16].

Прогибы концевых и промежуточных балок рам пассажирских вагонов допускаются в горизонтальной плоскости не более 10 мм при капитальном и не более 15 мм при деповском ремонте, а в вертикальной плоскости – не более 15 мм при всех видах ремонта вагонов [16].

При ремонте трещин в балках рам, ранее отремонтированных правкой, усиливающие накладки ставят на заклепках. Число заклепок должно быть таким, чтобы площадь их сечения с каждой стороны ремонтируемого участка была не меньше площади сечения накладок. Заклепки ставят в шахматном порядке [60].

Изношенные поверхности пятников ремонтируют наплавкой, если глубина износа не превышает 6 мм. Скользуны рам ремонтируют наплавкой при износе до 50 % номинальной толщины.

Трещины ремонтируют после устранения прогибов рам. Сквозные трещины необходимо засверлить по концам диаметром сверла 6–12 мм, несквозные трещины разделяют так, чтобы длина разделки превышала длину трещины на 15–20 мм с каждой стороны. Далее трещину вырубают на всю глубину залегания под углом 60–65°.

Разделку можно производить рубкой, фрезерованием, электродуговой или кислородной резкой. Для дуговой резки рекомендуется применять электроды типа ОЗР. После заварки трещины ремонтируемое место необходимо усилить постановкой накладок. Размеры и форма накладок зависят от размеров и расположения трещины. Плоские накладки устанавливают на продольные трещины, угловые накладки – на поперечные, а если трещина переходит с горизонтальной полки на вертикальную, то устанавливают корытообразную накладку. Двухсторонние накладки следует устанавливать при соединении балок встык или если после заварки трещин целой остается не более половины вертикальной стенки балки или не более одной горизонтальной полки. Трещины в деталях, изготовленных из низкоуглеродистой или низколегированной стали, необходимо заварить электродами типа Э42А или Э50А, а при полуавтоматической сварке – сварочными материалами, обеспечивающими свойства металла шва не ниже получаемых при сварке указанными типами электродов.

Толщина односторонней накладки должна быть в пределах 0,8–1,0 толщины основного металла, а двухсторонней – не менее половины. По длине накладки перекрывают концы трещин на 100–200 мм; при установке накладок с двух сторон шва необходимо, чтобы противоположные швы были смещены не менее чем на 30 мм.

Однако со следующими дефектами пассажирские вагоны ремонту не подлежат [48, 98, 103]:

– сквозная трещина на всей плоскости верхней полки одного из швеллеров хребтовой балки на расстоянии до 1020 мм от края горизонтального листа шкворневой балки к середине вагона (ЦМВО-66);

– сквозная трещина на всей плоскости нижней полки одного из швеллеров хребтовой балки на расстоянии до 680 мм от края горизонтального листа шкворневой балки к середине вагона (ЦМВО-66).

При анализе возникновения коррозионных повреждений установлено, что кузов пассажирского вагона является сварной металлической конструкцией, состоящей из набора продольных и поперечных несущих элементов, обтянутых снаружи силовой обшивкой из конструкционной стали.

После нанесения на внутренние поверхности кузова вагона лакокрасочных материалов накладывают теплоизоляционный материал. Теплоизоляция закрывается декоративными панелями, за которыми имеется много непроветриваемых и труднодоступных полостей, создающих при использовании в отопительный сезон системы отопления вагонов конденсат.

Из-за больших перепадов температур внутренней стороны обшивки и внутри отапливаемого вагона (особенно в холодный период года) на обшивке конденсируется большое количество влаги. Внутри кузовов пассажирских вагонов развивается интенсивная коррозия из-за постоянного наличия воды в результате конденсации влаги. Наличие конденсата также способствует образованию коррозии в труднодоступных местах на внутренней поверхности экипажной части вагона [12, 68].

Долговечность защитных покрытий и скорость коррозии отдельных элементов кузова представлены в таблицах 3.13 и 3.14.



**Таблица 3.13 – Долговечность защитных покрытий и скорость коррозии отдельных элементов кузова**

Элемент кузова	Расположение участков поверхности по длине вагона	Скорость коррозии, мм/год	Долговечность покрытия, годы	Толщина металла элементов кузова, мм
Внутренняя поверхность пола и нижнего пояса обшивки стен	Середина	0,15	10	2,0
	Консоль	0,25	6	2,0
	Зона туалетов	0,30	4	2,0
Нижняя часть торцевых стен		0,2	6	2,0
Внутренняя поверхность среднего и верхнего пояса обшивки боковых стен	Середина	0,07	14	1,5
	Консоль	0,07	14	1,5
	Зона туалетов	0,1	12	1,5
Внутренняя поверхность крыши	По всей длине вагона	0,07	12	1,5–2,0

**Таблица 3.14 – Долговечность металлоконструкции в зависимости от скорости коррозии элементов хребтовой балки с минимально допустимыми толщинами основных элементов**

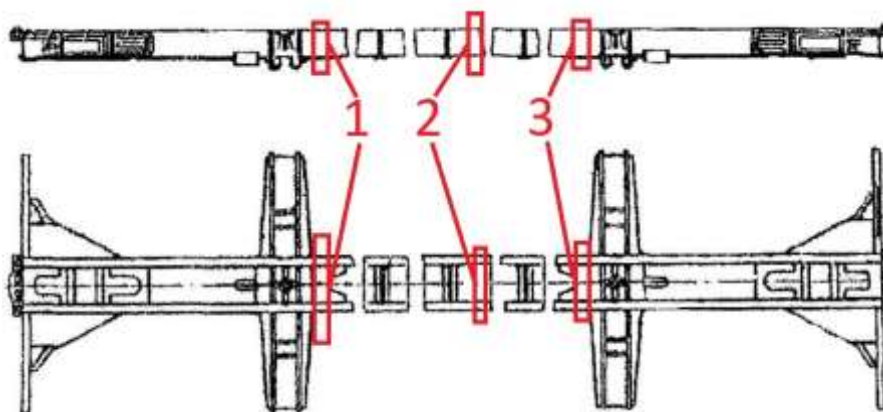
№ п/п	Элементы конструкции		Толщина элемента (мм)		Допустимая коррозия	Браковка (лет)
			минимально допустимая	бракуется		
1	Хребтовая балка, консольная часть	Вертикальные стенки	8,6	6,71	1,89	~25,3
		Полки	12,7	10	2,7	~38,5
2	Хребтовая балка, средняя часть	Вертикальные стенки	5,8	4,69	1,11	~14
		Полки	10,3	8,01	2,02	~27,8
3	Боковая продольная балка	Вертикальные стенки	5,5	4,69	0,81	<b>~9,9</b>
		Полки	5,5	4,69	0,81	<b>~9,9</b>
4	Шкворневая балка	Верхний и нижний листы	9,5	7,28	2,22	~32,3
		Стенки	7,5	5,78	1,72	~23,1
5	Концевая балка	Вертикальная стенка	8,6	6,72	1,88	~25,2
		Полки	14,7	10	4,7	Более 50

По результатам проведенных исследований долговечности металлоконструкций при условии использования элементов конструкции с минимально допустимыми при изготовлении толщинами установлено, что наиболее подверженной коррозионному износу являются вертикальные стенки и полки боковой продольной балки.

### 3.5. Исследование полей напряжений в хребтовой балке

Проведенный анализ состояния трёх хребтовых балок вагонов моделей 61-425 и 61-828, исключённых из инвентаря по истечении назначенного срока службы (первая хребтовая балка 1980 года изготовления, далее – модель 1, вторая и третья 1992 года изготовления, соответственно, далее – модель 2 и модель 3), показал, что основные напряжения и коррозионные воздействия возникают в районе сварных швов.

Для проведения исследований из хребтовых балок вагонов вырезано по 3 фрагмента: по одному с котловой и не котловой стороны вагона в районе приварки к шкворневым балкам вагонов и по одному в средней части балки на значительном удалении от привариваемых элементов рамы вагонов. Вырезка осуществлялась с использованием угловой шлифовальной машины для исключения нагрева металлических элементов (рисунок 3.15).



**Рисунок 3.15 – Схематическое расположение вырезанных фрагментов из хребтовых балок вагонов моделей 61-828 и 61-425**

Далее непосредственно для проведения нижеизложенного исследования из каждого элемента хребтовой балки вырезано по 4 фрагмента размером 5x60 мм (вырезка осуществлялась гидроабразивным способом также в целях исключения нагрева вырезаемых фрагментов хребтовой балки и предотвращения изменения структуры металла исследуемых образцов).

В дальнейшем проводились вытравливание и измерение остаточных напряжений и величины деформации от глубины травления каждого элемента по методу Н.Н. Давиденкова по методике ЦНИИТМАШ [4, 93, 102, 124].

Определение остаточных и начальных напряжений в поверхностном слое деталей механическим методом осуществлялось с применением следующего оборудования:

- установка для удаления поверхностного слоя (далее – ПС) путем травления и измерения деформаций образцов;
- секундомер;
- микрометр;
- измерительный микроскоп;
- индикаторное приспособление для измерения деформаций образцов;
- продольные образцы.

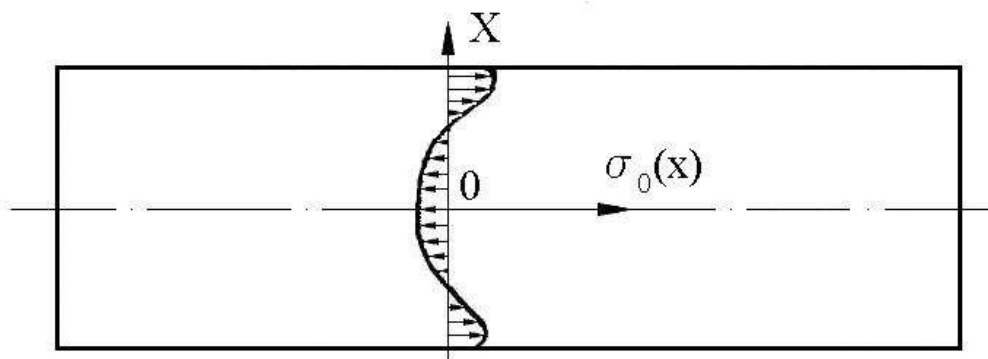
Остаточные напряжения – это те, которые существуют и уравниваются в твердом теле после устранения причин, вызвавших их появление, они взаимно уравновешены по сечению детали (рисунок 3.16), то есть главный вектор и главный момент эпюры распределения остаточных напряжений по сечению детали равны нулю

$$\int_F \sigma_0(x) dF = 0 \quad (3.36)$$

где:  $F$  – площадь сечения детали,

$x$  – текущая координата,

$\sigma_0(x)$  – остаточные напряжения.



**Рисунок 3.16 – Схема симметричной эпюры распределения остаточных напряжений по сечению детали**

Остаточные напряжения практически имеют место в любых твердых телах. Это объясняется анизотропией свойств реальных твердых тел, например разными коэффициентами линейного расширения различных структурных составляющих твердого тела.

Факторами, которые вызывают образование начальных и остаточных напряжений, являются:

- пластическая деформация ПС;
- термопластическая деформация ПС в результате его нагрева или охлаждения;
- изменение удельного объема ПС, вызванное структурно-фазовыми превращениями или химическими процессами;
- изменение удельного объема ПС в результате его пластической деформации.

В зависимости от условий упругопластической деформации в ПС формируются остаточные напряжения растяжения или сжатия.

Тепловой фактор оказывает влияние на формирование напряжений лишь в тонком слое. Неравномерный нагрев может сопровождаться термопластическими деформациями, которые создают остаточные напряжения растяжения после остывания детали. Интенсивное охлаждение ПС, сопровождающееся термопластическими деформациями, приводит к образованию остаточных напряжений сжатия.

Структурно-фазовые превращения и химические процессы в ПС в зависимости от удельных объемов вновь образующихся структур, фаз и соединений могут вызывать образование как напряжений растяжения, так и сжатия. Например, превращение аустенита в мартенсит сопровождается возникновением начальных и остаточных напряжений сжатия, так как удельный объем мартенсита больше, чем аустенита.

В зависимости от протяженности напряжённого поля остаточные напряжения условно подразделяют на макро-, микронапряжения и субмикронапряжения.

При односторонней обработке:  $\sigma_H^0(x)$  – начальные напряжения;  $\sigma_0^0(x)$  – остаточные напряжения;  $\sigma_p(x)$  – напряжения от продольной деформации под действием силы  $P_H$ ;  $\sigma_M(x)$  – напряжения от изгиба под действием момента  $M_H = \frac{P_H}{\left(\frac{\delta}{2} - x_c\right)}$ .

Принципиальная схема образования остаточных напряжений рассмотрена на примере обработки прямоугольной детали без технологически наследственных остаточных напряжений. Заготовка (деталь) закреплена абсолютно жёстко и не деформируется в процессе обработки. В результате обработки в слое толщиной «а» образовались начальные напряжения  $\sigma_H^0(x)$  (рисунок 3.17).

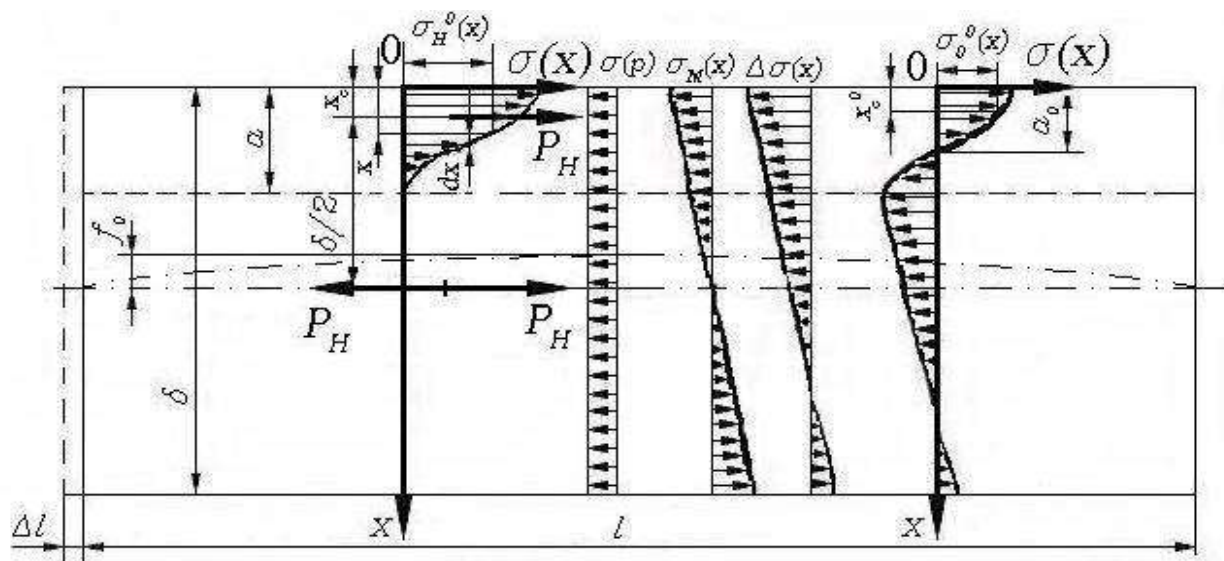


Рисунок 3.17 – Схема образования остаточных напряжений

Образование неуравновешенных напряжений эквивалентно приложению к поверхности детали осевой силы  $P_H$  и приведённого к поверхности изгибающего момента  $M_H^n$ , которые определяются выражениями

$$P_H = \int_0^a \sigma_H^0(x) dx \quad (3.37)$$

$$M_H^n = \int_0^a \sigma_H^0(x) x dx. \quad (3.38)$$

Величины  $P_H$  и  $M_H^n$  называют интегральными характеристиками эпюры начальных напряжений. После снятия с детали внешних связей (раскрепления) под действием эксцентрично приложенной силы  $P_H$  происходит её изгиб на величину  $f_0$  (стрела прогиба) и продольная деформация (удлинение, если образовались начальные напряжения сжатия, и укорочения – при начальных напряжениях растяжения)  $-\Delta l$ . Начальные напряжения перераспределятся по всему сечению детали, уравниваются и превратятся в остаточные напряжения, т.е. остаточные напряжения можно представить как алгебраическую сумму

$$\sigma_0^0(x) = \sigma_H^0(x) - \sigma_M(x) - \sigma_p \quad (3.39)$$

где:  $\sigma_M(x)$  – напряжения от изгибающего момента  $M_H$ ,

$\sigma_p$  – напряжения от осевой силы  $P_H$ .

Выражение (3.39) можно также представить в следующем виде:

$$\sigma_0^0(x) = \sigma_H^0(x) - \frac{P_H}{\delta} - \frac{6M_H}{\delta^2} \left(1 - 2\frac{x}{\delta}\right). \quad (3.40)$$

Если известны  $f_0$  и  $\Delta l$ , то

$$\sigma_0^0(x) = \sigma_H^0(x) - 4E \frac{f_0}{l^2} (\delta - 2x) - E \frac{\Delta l}{l} \quad (3.41)$$

где:  $E$  – модуль упругости материала детали.

Из выражений (3.40), (3.41) и схемы на рисунке 3.17 следует, что эпюра остаточных напряжений в детали зависит как от эпюры начальных напряжений, так и от жёсткости (толщины) детали. При одних и тех же начальных напряжениях с уменьшением жёсткости поперечного сечения детали увеличиваются ее технологические остаточные деформации и снижается уровень остаточных напряжений. Если эпюра начальных напряжений имеет участки с разными знаками, т.е. напряжениями растяжения и напряжениями сжатия, то уровень остаточных напряжений непревалирующего знака возрастает. С увеличением жёсткости остаточные напряжения приближаются к начальным.

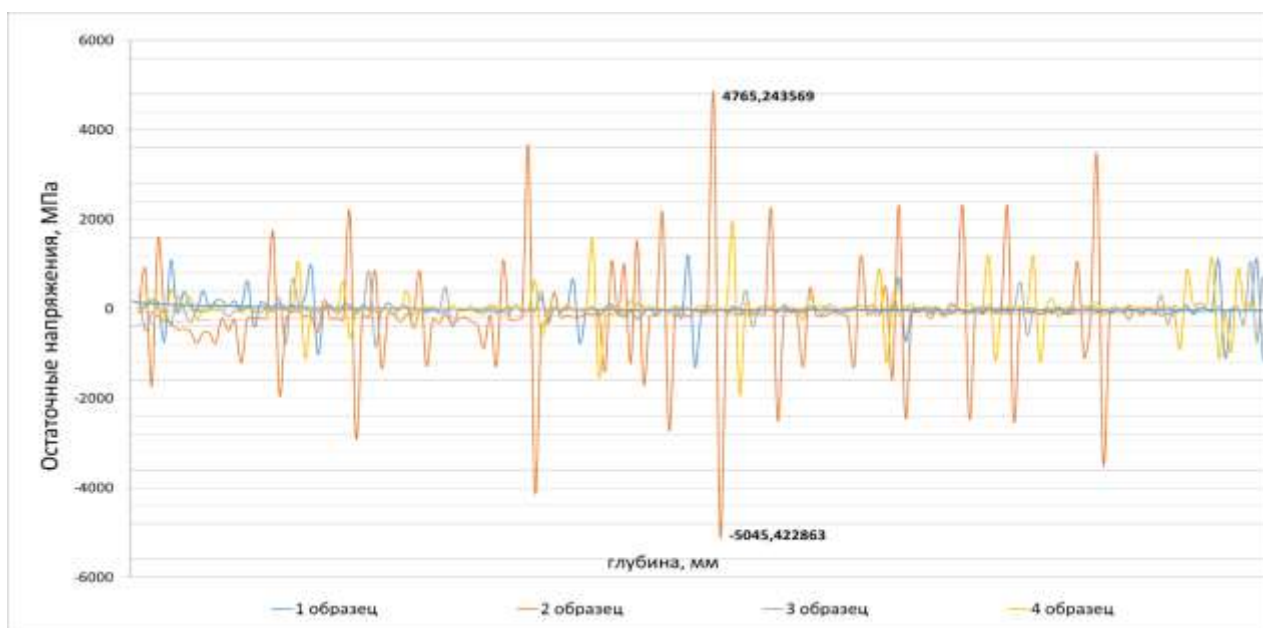
Для деталей простой формы о степени изменения начальных напряжений при их превращении в остаточные напряжения можно судить по относительной толщине напряжённого слоя ( $a/\delta$ ). У маложёстких деталей при больших значениях ( $a/\delta$ ) остаточные напряжения могут быть существенно меньше, чем у деталей высокой жёсткости.

Поэтому оценку влияния технологических процессов обработки на напряжённое состояние ПС необходимо более объективно проводить по начальным напряжениям, которые инвариантны к жёсткости детали.

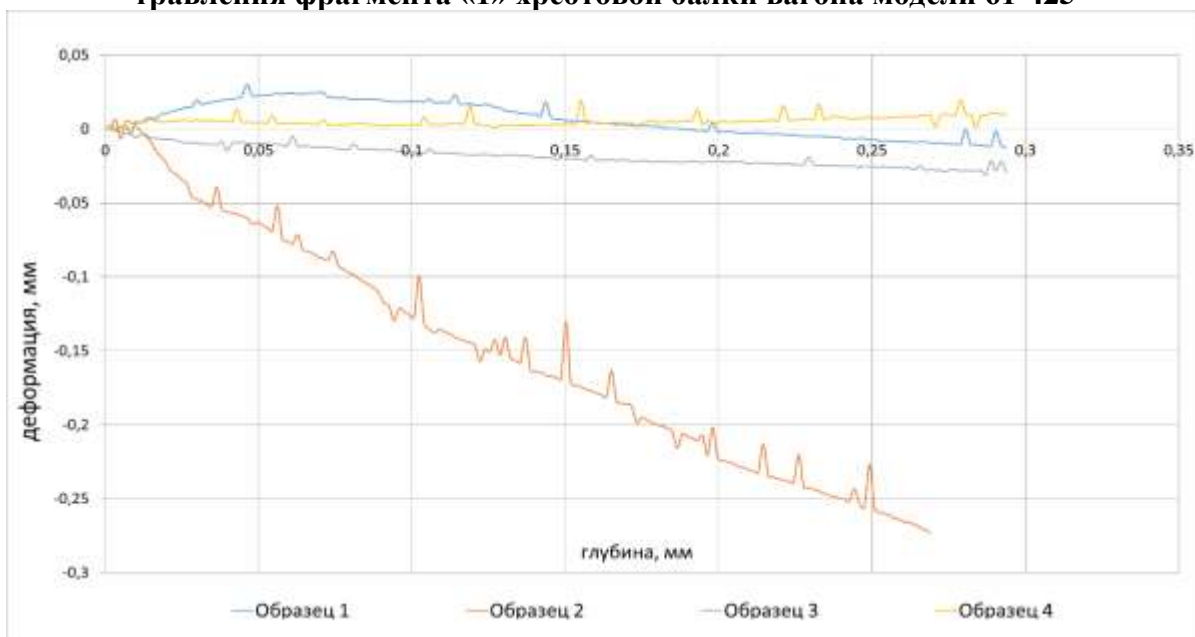
При механической обработке остаточные напряжения являются результатом перераспределения начальных напряжений после удаления внешних связей и воздействий на деталь. В этом случае эпюру остаточных напряжений условно можно разделить на активную и уравнивающую. Первая представляет распределение напряжений, непосредственно вызванных процессом обработки, вторая – напряжений, которые являются реакцией на действия активной части эпюры напряжений. С достаточной точностью можно считать, что разделяются эти две части точкой перехода эпюры через ноль, ближайшей к линии раздела поверхностного слоя и основного металла.

В результате исследования четырех вырезанных элементов первого фрагмента первого вагона («1» на рисунке 3.15), вагон модели 61-425, изготовлен в 1980 году, получены следующие результаты:





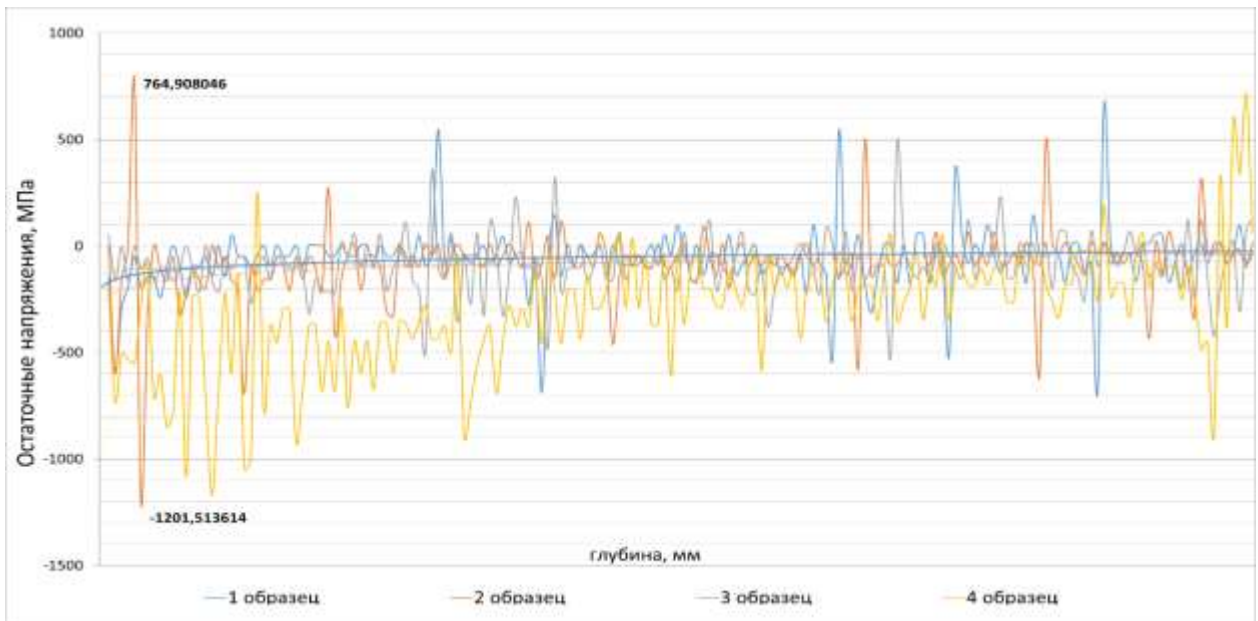
**Рисунок 3.18 – Распределение остаточных напряжений в зависимости от глубины травления фрагмента «1» хребтовой балки вагона модели 61-425**



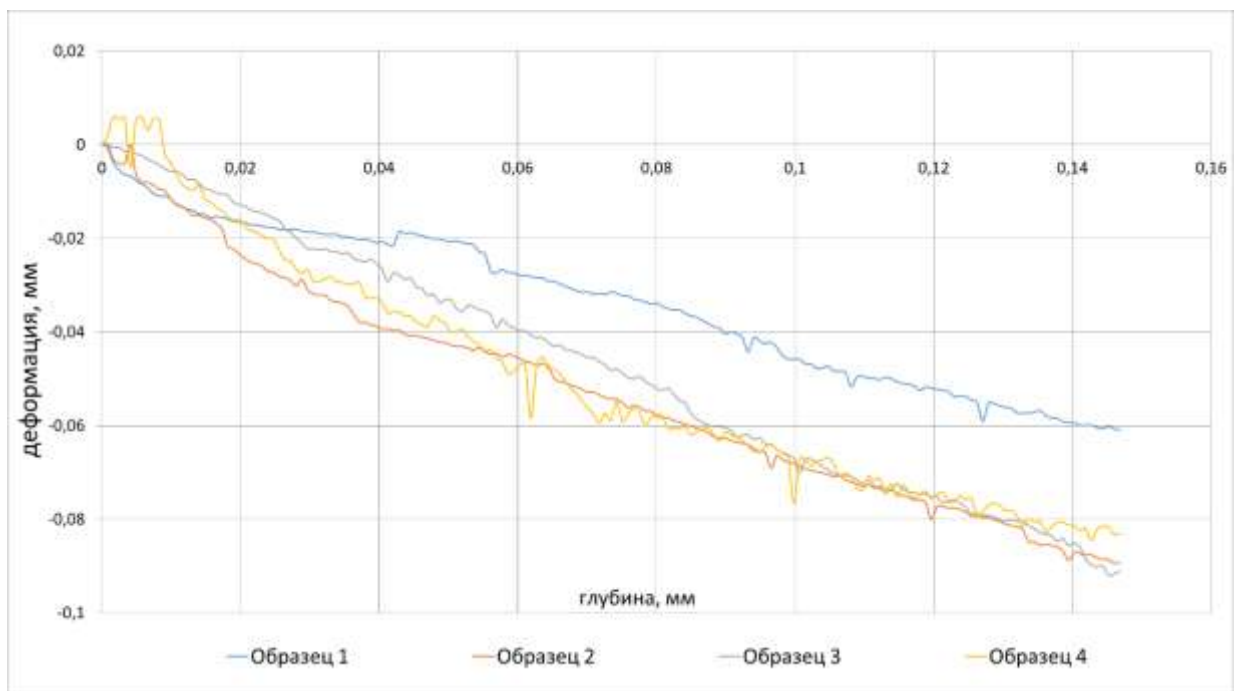
**Рисунок 3.19 – Распределение деформации по глубине травления фрагмента «1» хребтовой балки вагона модели 61-425**

Наибольшие остаточные напряжения колеблются в знакопеременном интервале от  $-5045$  МПа до  $4765$  МПа, а глубина деформации достигает  $0,27$  мм.

При проведении аналогичного исследования второго фрагмента первого вагона («2» на рисунке 3.15) модели 61-425 получены следующие результаты:



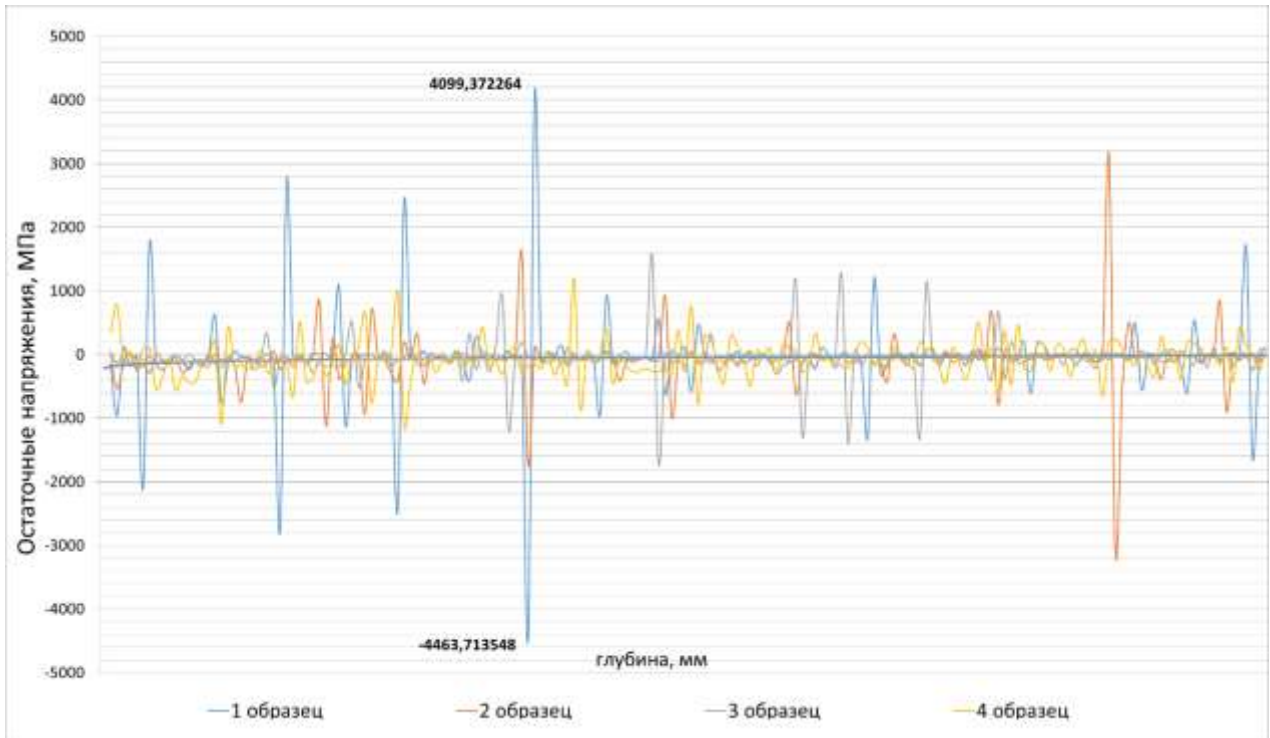
**Рисунок 3.20 – Распределение остаточных напряжений в зависимости от глубины травления фрагмента «2» хребтовой балки вагона модели 61-425**



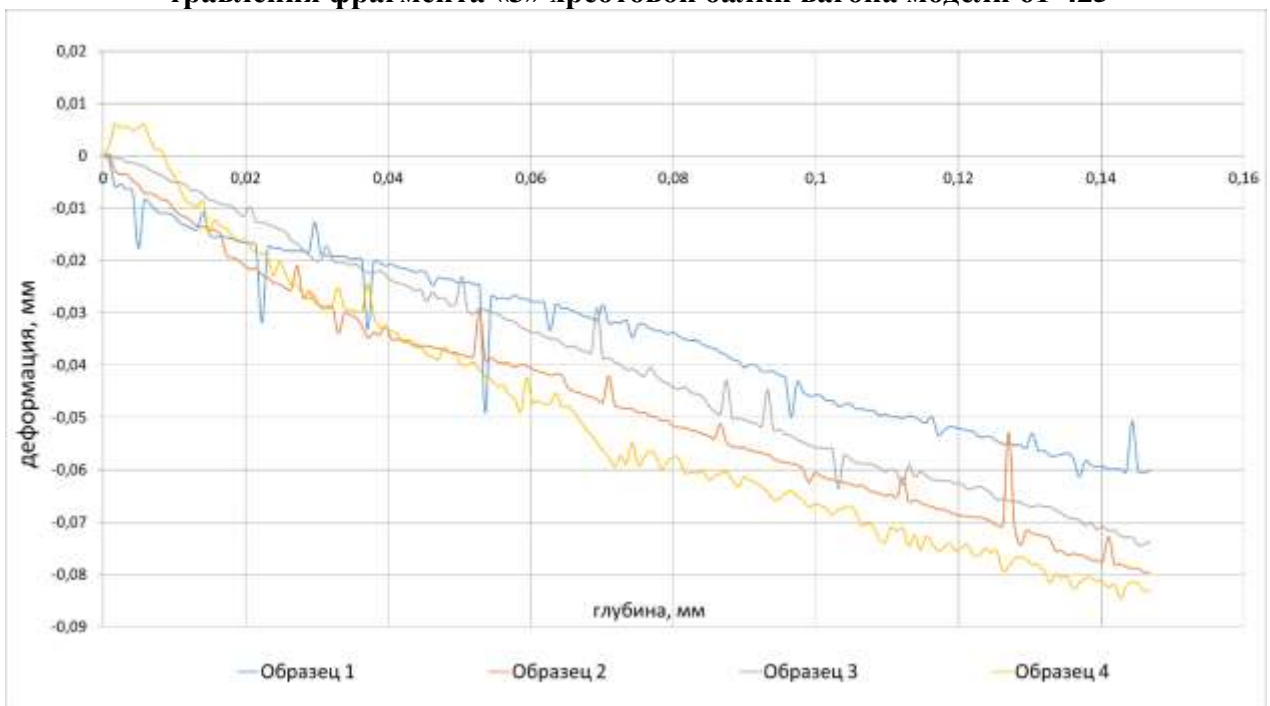
**Рисунок 3.21 – Распределение деформации по глубине травления фрагмента «2» хребтовой балки вагона модели 61-425**

Наибольшие остаточные напряжения колеблются в знакопеременном интервале от  $-1201$  МПа до  $764$  МПа, а глубина деформации достигает  $0,09$  мм.

При исследовании третьего фрагмента первого вагона («3» на рисунке 3.15) получены следующие результаты:



**Рисунок 3.22 – Распределение остаточных напряжений в зависимости от глубины травления фрагмента «3» хребтовой балки вагона модели 61-425**

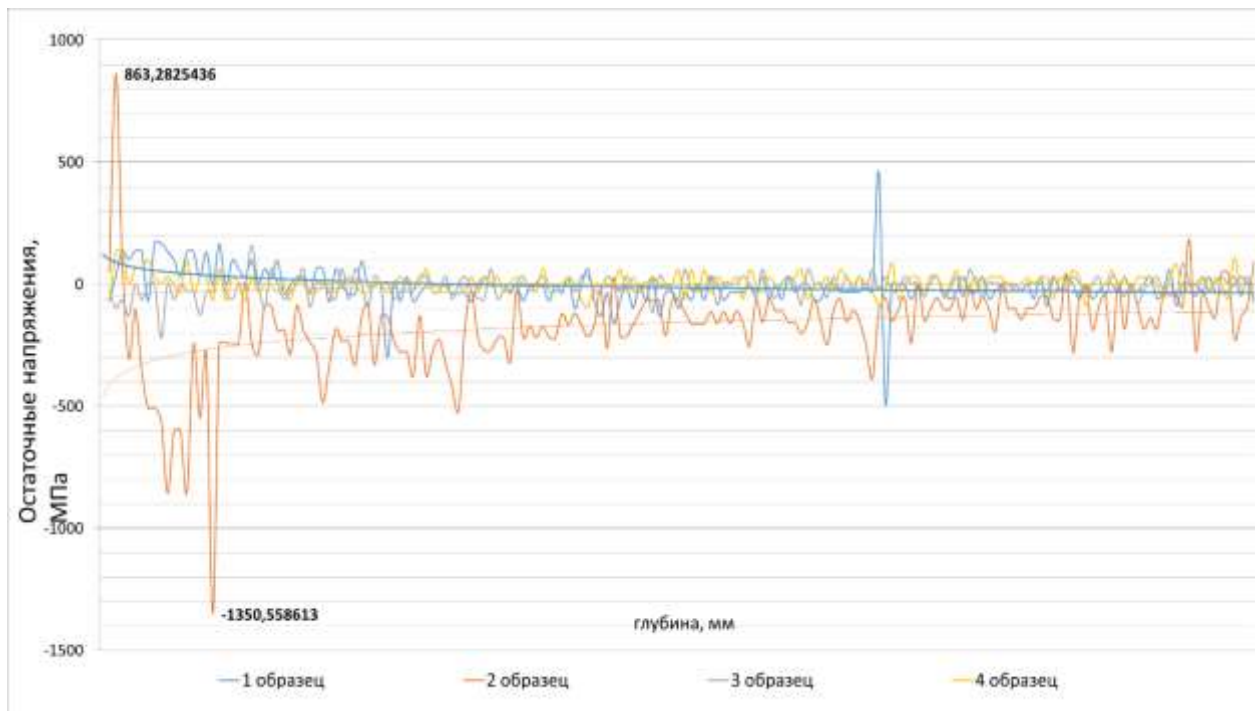


**Рисунок 3.23 – Распределение деформации по глубине травления фрагмента «3» хребтовой балки вагона модели 61-425**

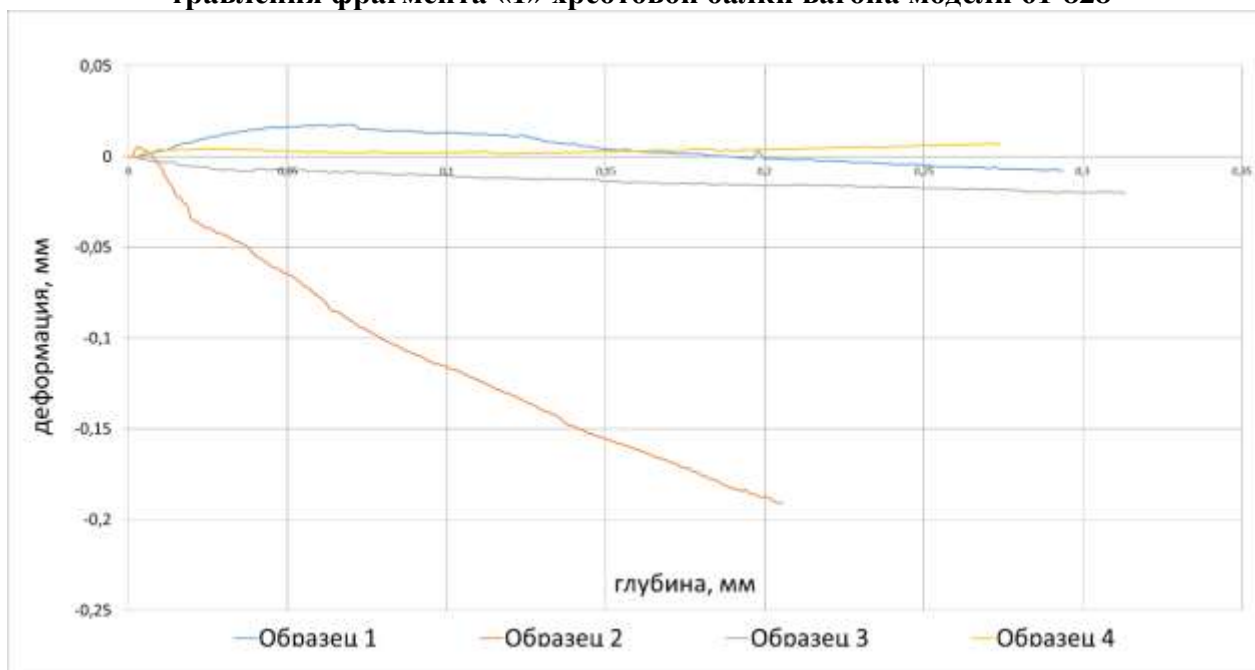
Наибольшие остаточные напряжения колеблются в знакопеременном интервале от  $-4463$  МПа до  $4099$  МПа, а глубина деформации достигает  $0,082$  мм.

При исследовании вырезанных фрагментов из хребтовой балки (рисунок 3.15) второго вагона модели 61-828, изготовленного в 1992 году, по аналогичным параметрам получены следующие результаты исследования:

Первый фрагмент («1» на рисунке 3.15):



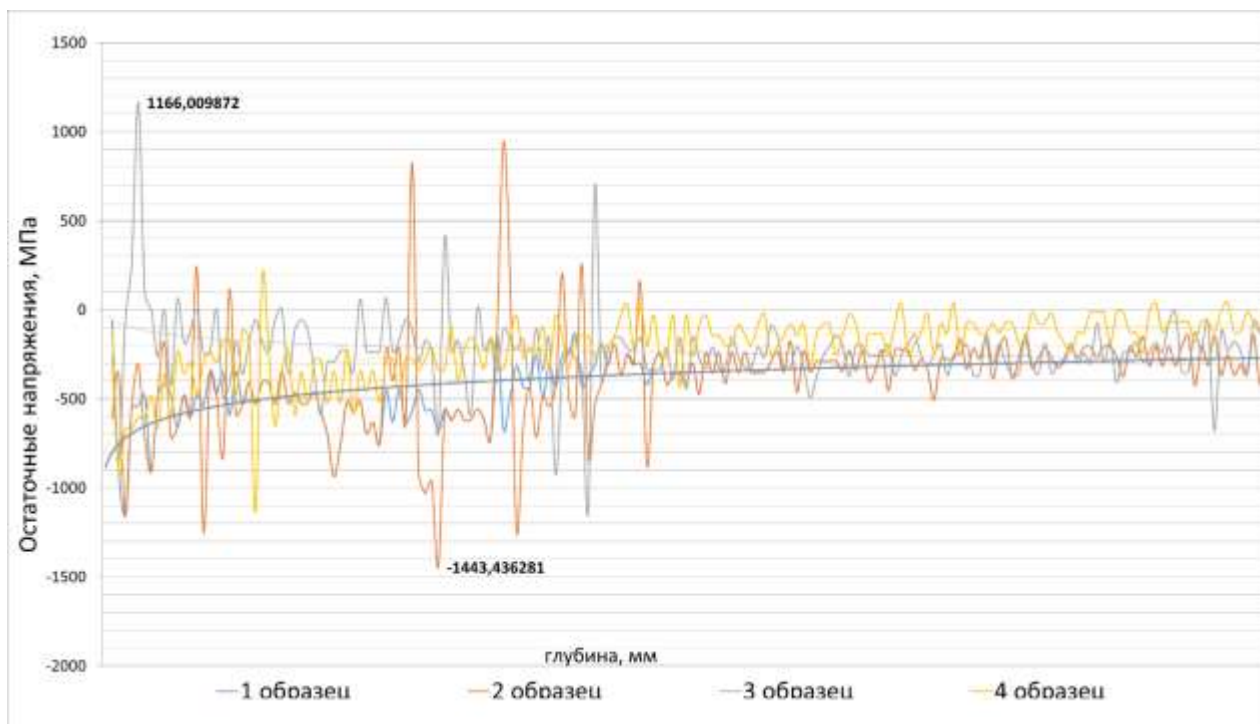
**Рисунок 3.24 – Распределение остаточных напряжений в зависимости от глубины травления фрагмента «1» хребтовой балки вагона модели 61-828**



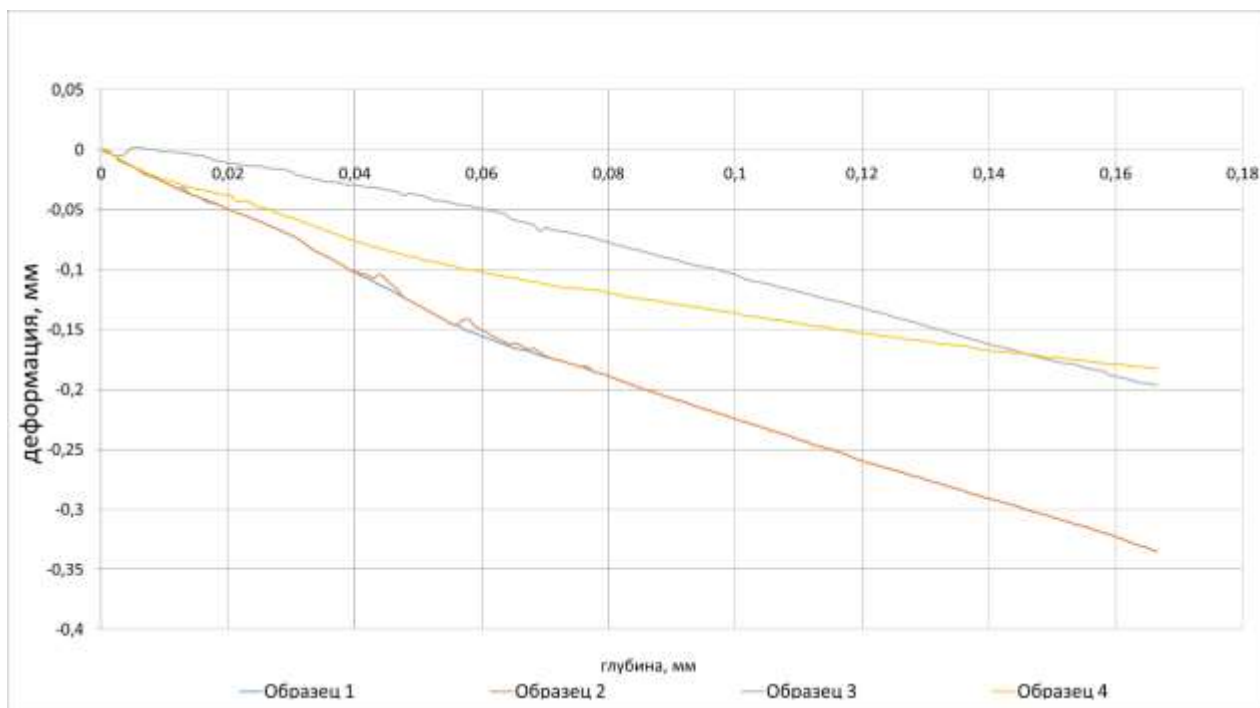
**Рисунок 3.25 – Распределение деформации по глубине травления фрагмента «1» хребтовой балки вагона модели 61-828**

Наибольшие остаточные напряжения колеблются в знакопеременном интервале от  $-1359$  МПа до  $863$  МПа, а глубина деформации достигает  $0,19$  мм.

Второй фрагмент («2» на рисунке 3.15):



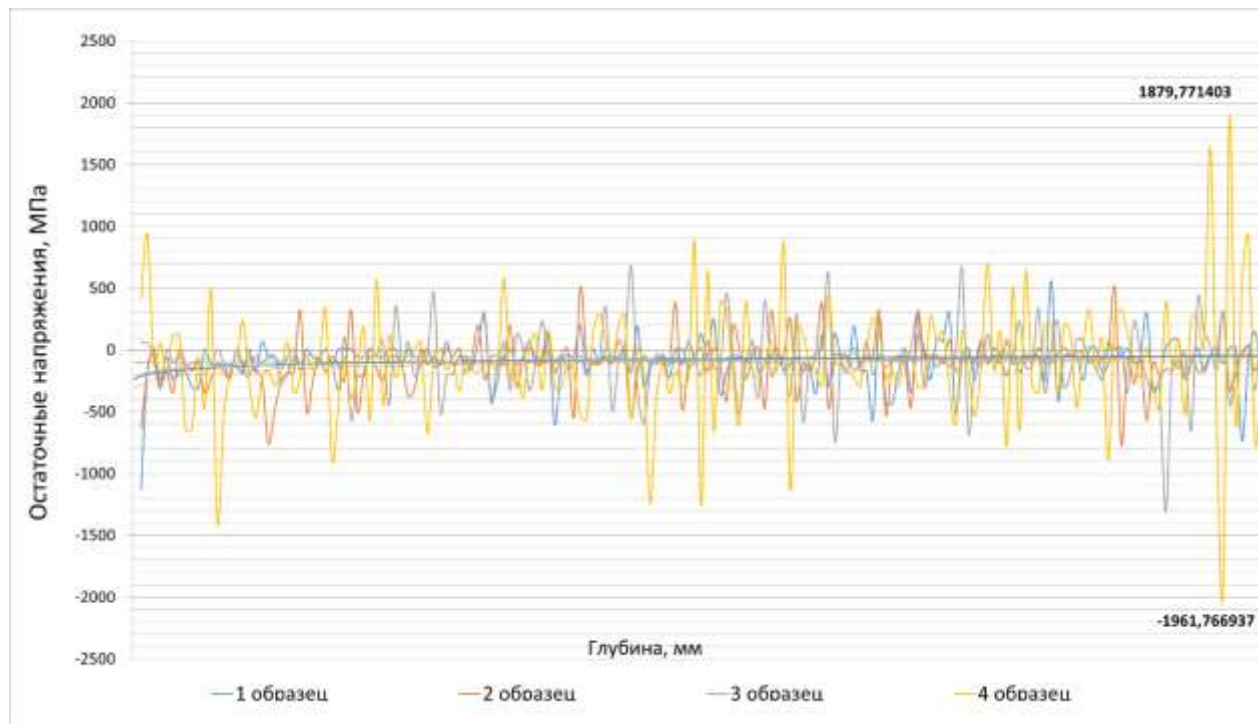
**Рисунок 3.26 – Распределение остаточных напряжений в зависимости от глубины травления фрагмента «2» хребтовой балки вагона модели 61-828**



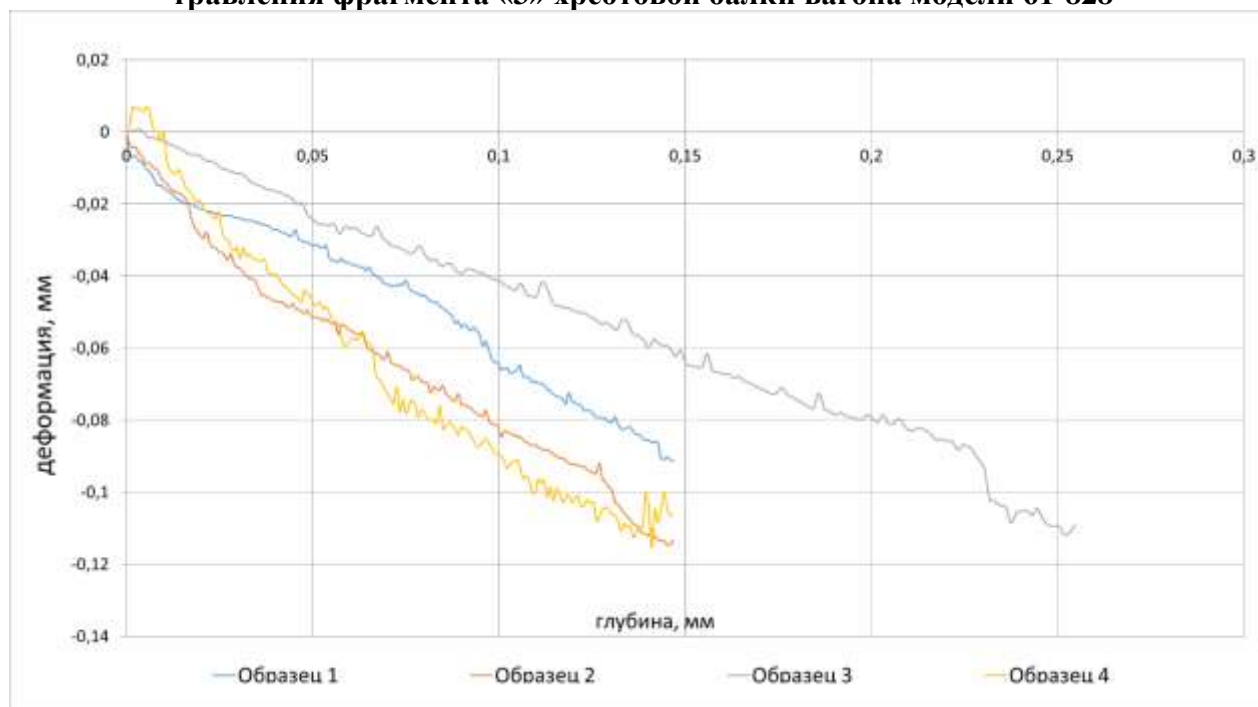
**Рисунок 3.27 – Распределение деформации по глубине травления фрагмента «2» хребтовой балки вагона модели 61-828**

Наибольшие остаточные напряжения колеблются в знакопеременном интервале от  $-1443$  МПа до  $1166$  МПа, а глубина деформации достигает  $0,33$  мм.

Третий фрагмент («3» на рисунке 3.15):



**Рисунок 3.28 – Распределение остаточных напряжений в зависимости от глубины травления фрагмента «3» хребтовой балки вагона модели 61-828**



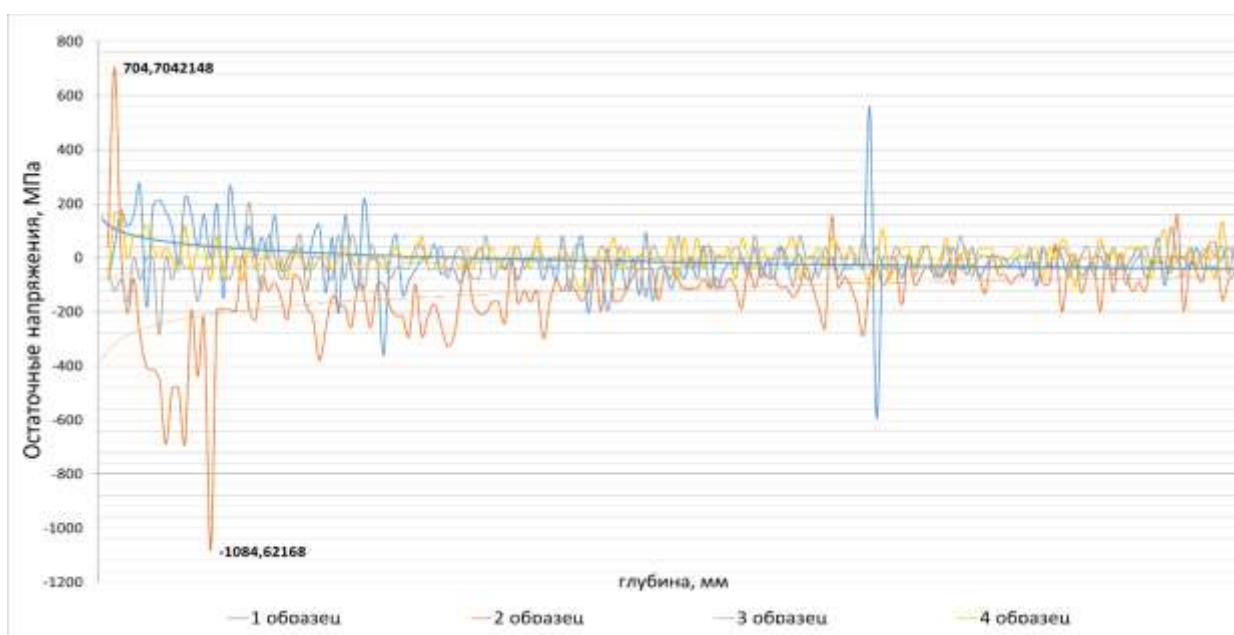
**Рисунок 3.29 – Распределение деформации по глубине травления фрагмента «3» хребтовой балки вагона модели 61-828**



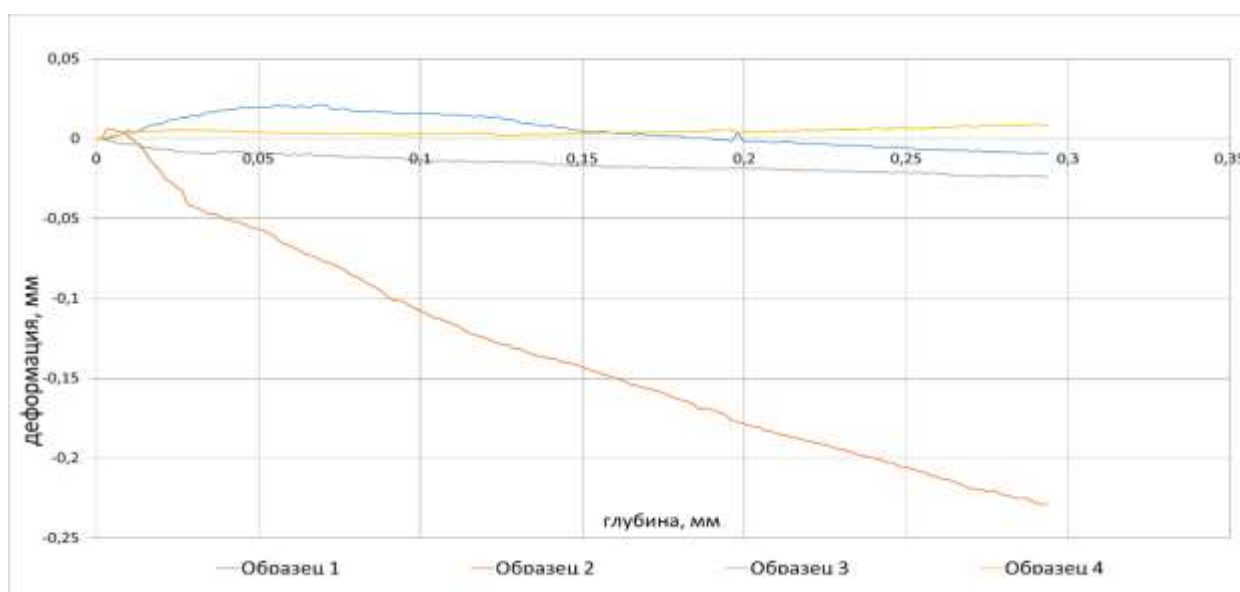
Наибольшие остаточные напряжения колеблются в знакопеременном интервале от  $-1961$  МПа до  $1879$  МПа, а глубина деформации достигает  $0,11$  мм.

При исследовании фрагментов, вырезанных из хребтовой балки третьего вагона (рисунок 3.15), вагон модели 61-828, изготовленный в 1992 году, по аналогичным параметрам получены следующие результаты исследования:

Первый фрагмент («1» на рисунке 3.15):



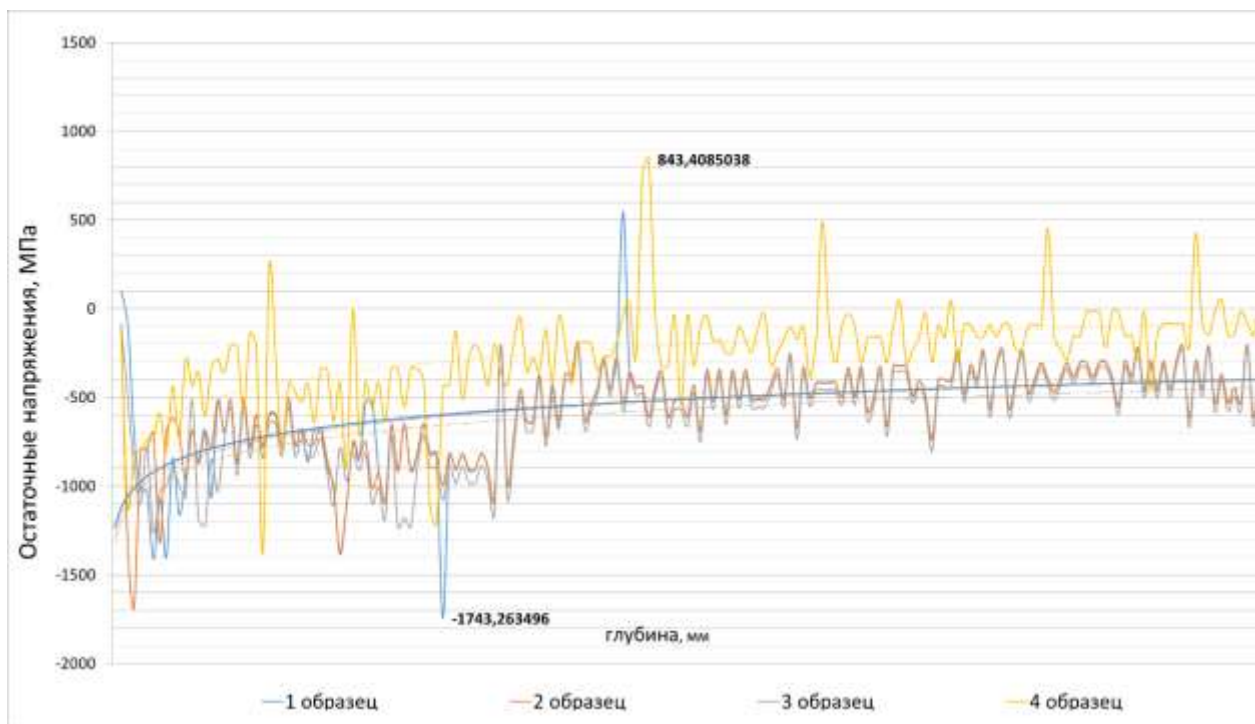
**Рисунок 3.30 – Распределение остаточных напряжений в зависимости от глубины травления фрагмента «1» хребтовой балки вагона модели 61-828**



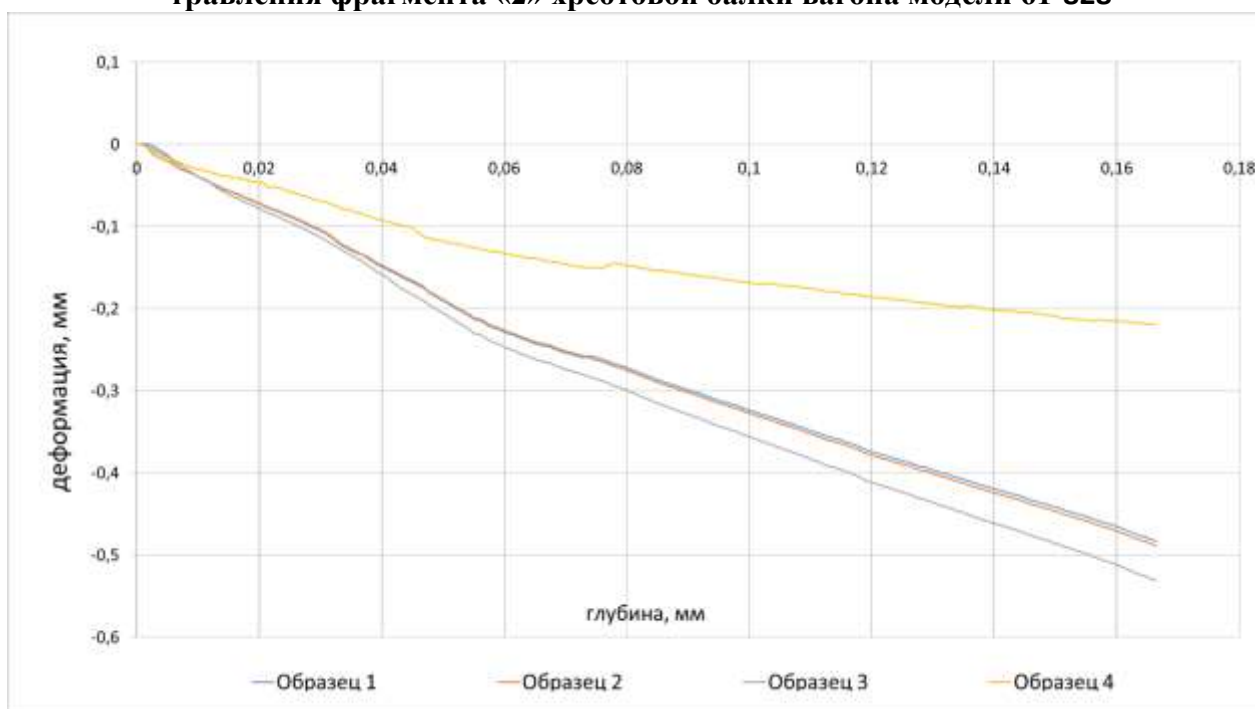
**Рисунок 3.31 – Распределение деформации по глубине травления фрагмента «1» хребтовой балки вагона модели 61-828**

Наибольшие остаточные напряжения колеблются в знакопеременном интервале от  $-1084$  МПа до  $704$  МПа, а глубина деформации достигает  $0,23$  мм.

Второй фрагмент («2» на рисунке 3.15):



**Рисунок 3.32 – Распределение остаточных напряжений в зависимости от глубины травления фрагмента «2» хребтовой балки вагона модели 61-828**

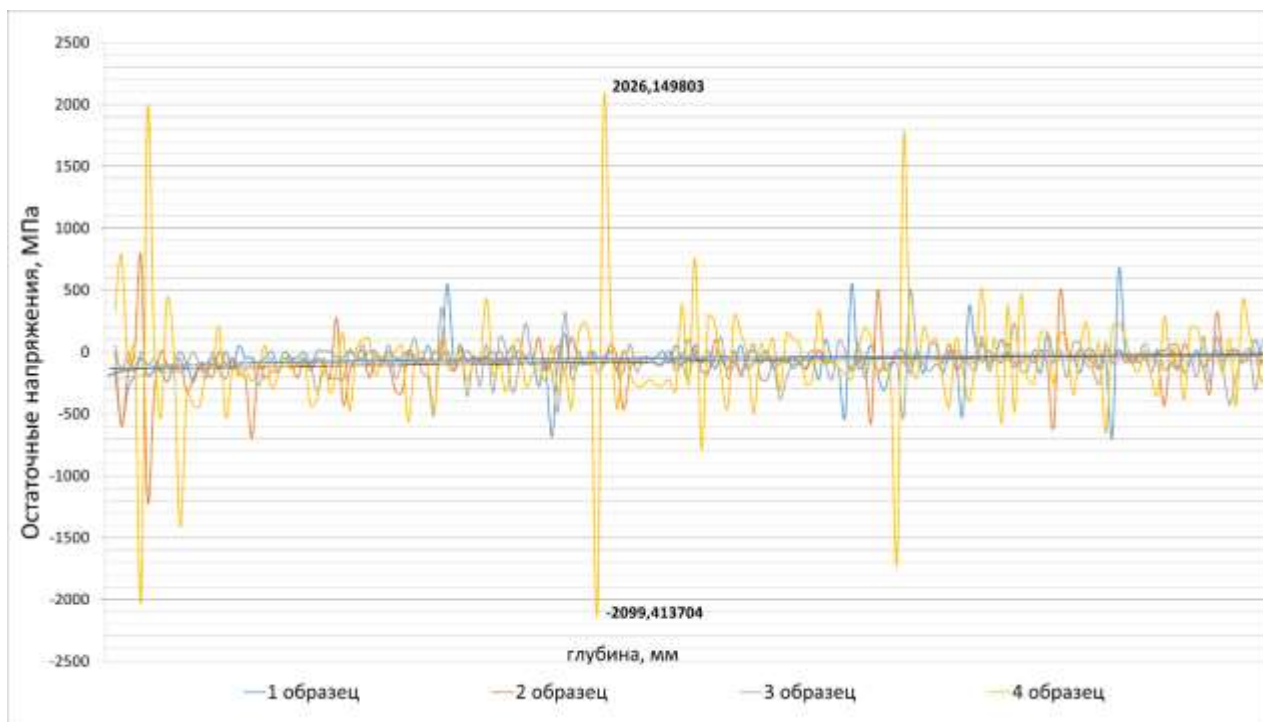


**Рисунок 3.33 – Распределение деформации по глубине травления фрагмента «2» хребтовой балки вагона модели 61-828**

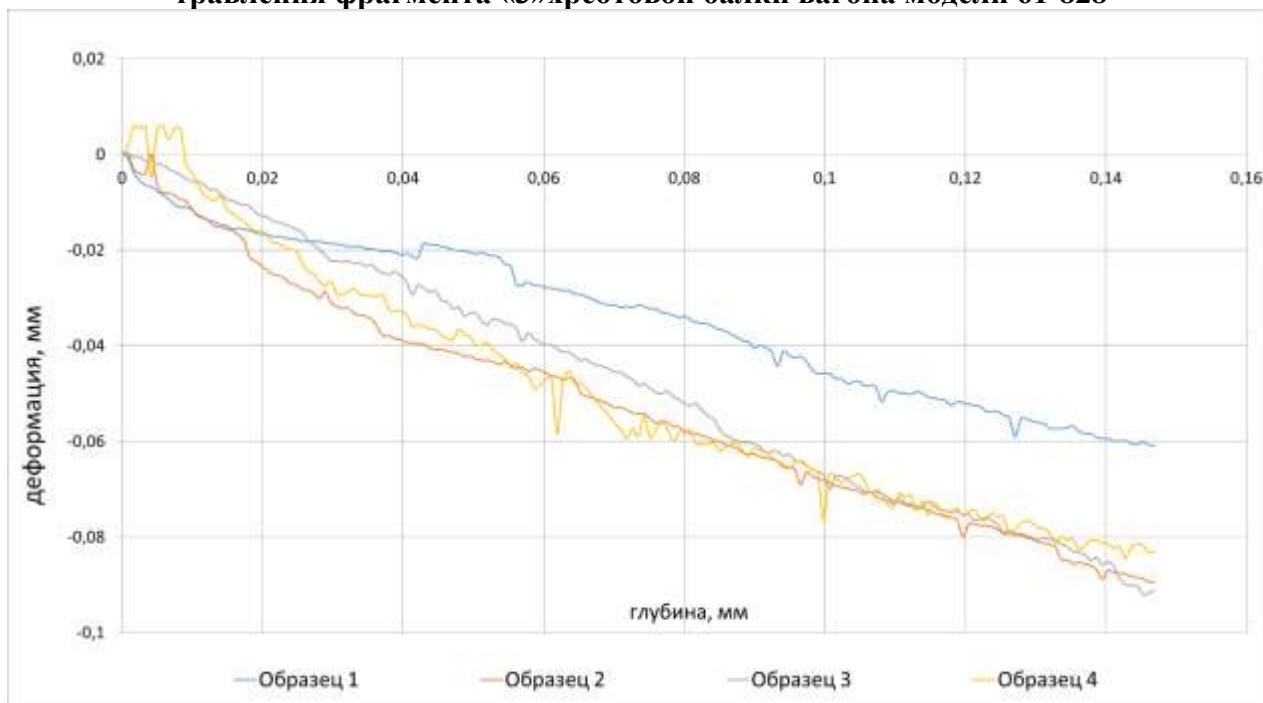


Наибольшие остаточные напряжения колеблются в знакопеременном интервале от  $-1743$  МПа до  $843$  МПа, а глубина деформации достигает  $0,53$  мм.

Третий фрагмент («3» на рисунке 3.15):



**Рисунок 3.34 – Распределение остаточных напряжений в зависимости от глубины травления фрагмента «3» хребтовой балки вагона модели 61-828**



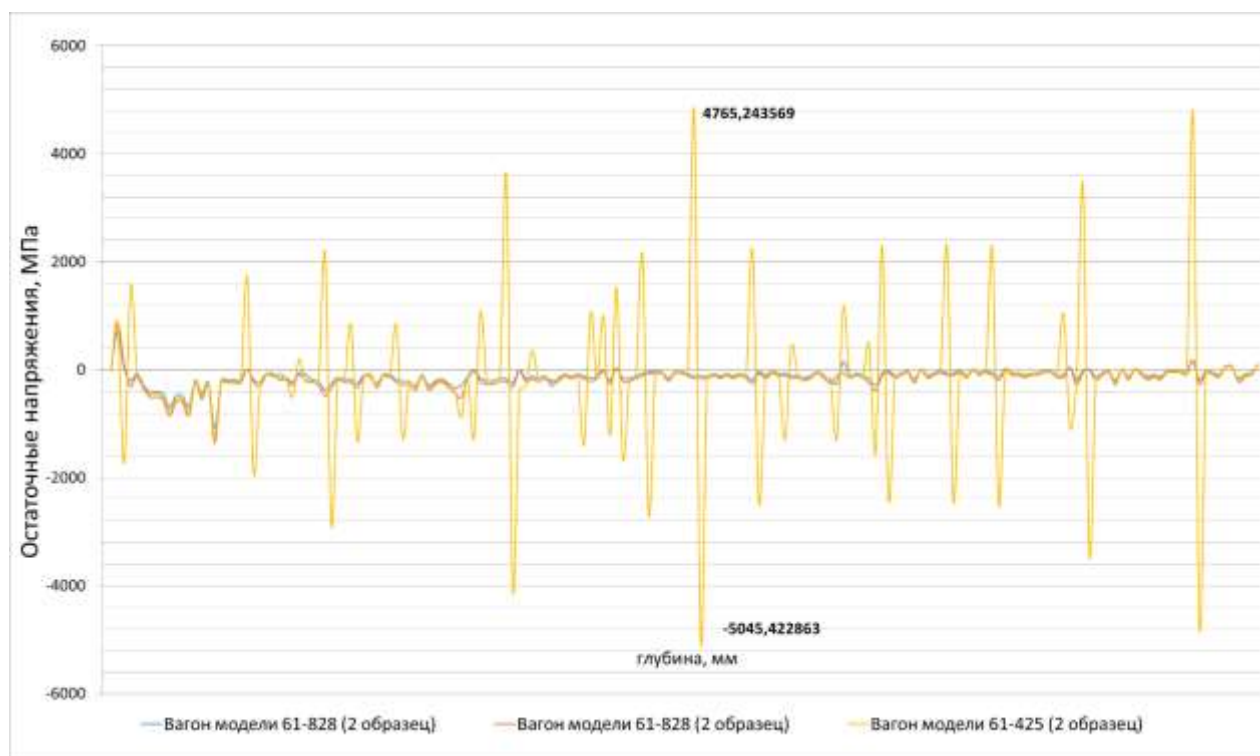
**Рисунок 3.35 – Распределение деформации по глубине травления фрагмента «3» хребтовой балки вагона модели 61-828**

Наибольшие остаточные напряжения колеблются в знакопеременном интервале от  $-2099$  МПа до  $2026$  МПа, а глубина деформации достигает  $0,09$  мм.

По результатам проведенных исследований сформирована модель максимального наличия остаточных напряжений и глубины деформации. В результате обработки данных получены результаты, представленные на рисунке 3.36.

Возникающие остаточные напряжения и глубины деформации трёх аналогичных участков, вырезанных из хребтовых балок трёх исследуемых вагонов, следующие:

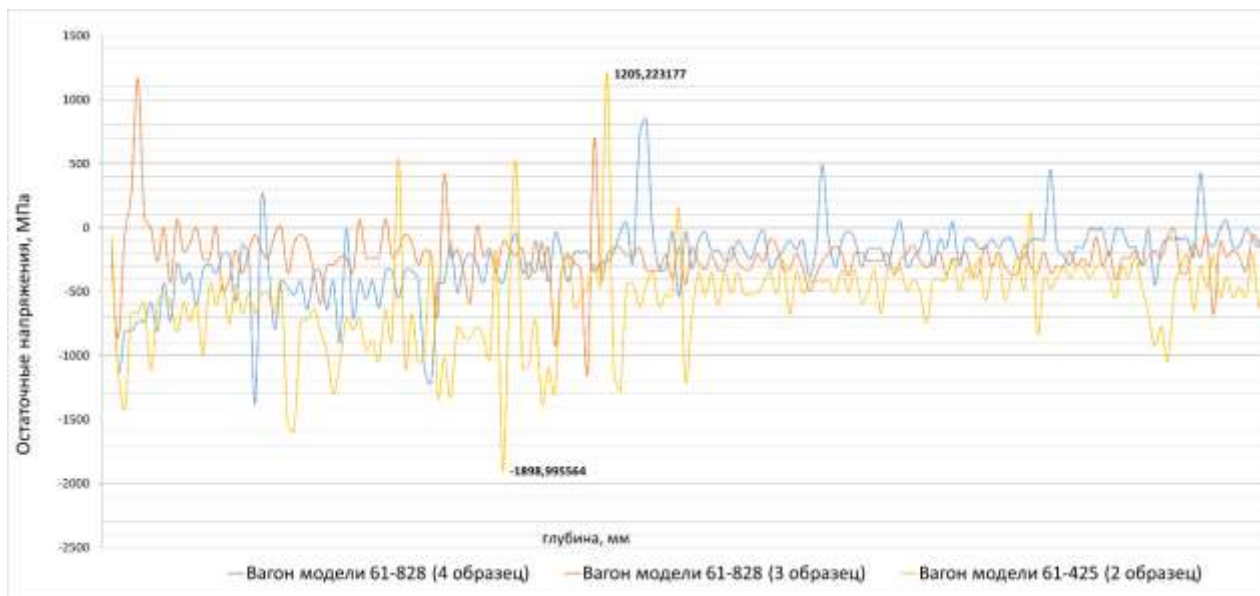
Участок «1» рисунка 3.15:



**Рисунок 3.36 – Распределение остаточных напряжений в фрагментах «1» хребтовых балок всех исследуемых моделей вагонов**

Наибольшие остаточные напряжения колеблются в знакопеременном интервале от  $-5045$  МПа до  $4765$  МПа. Наибольшие остаточные напряжения зафиксированы на хребтовой балке вагона модели 61-425.

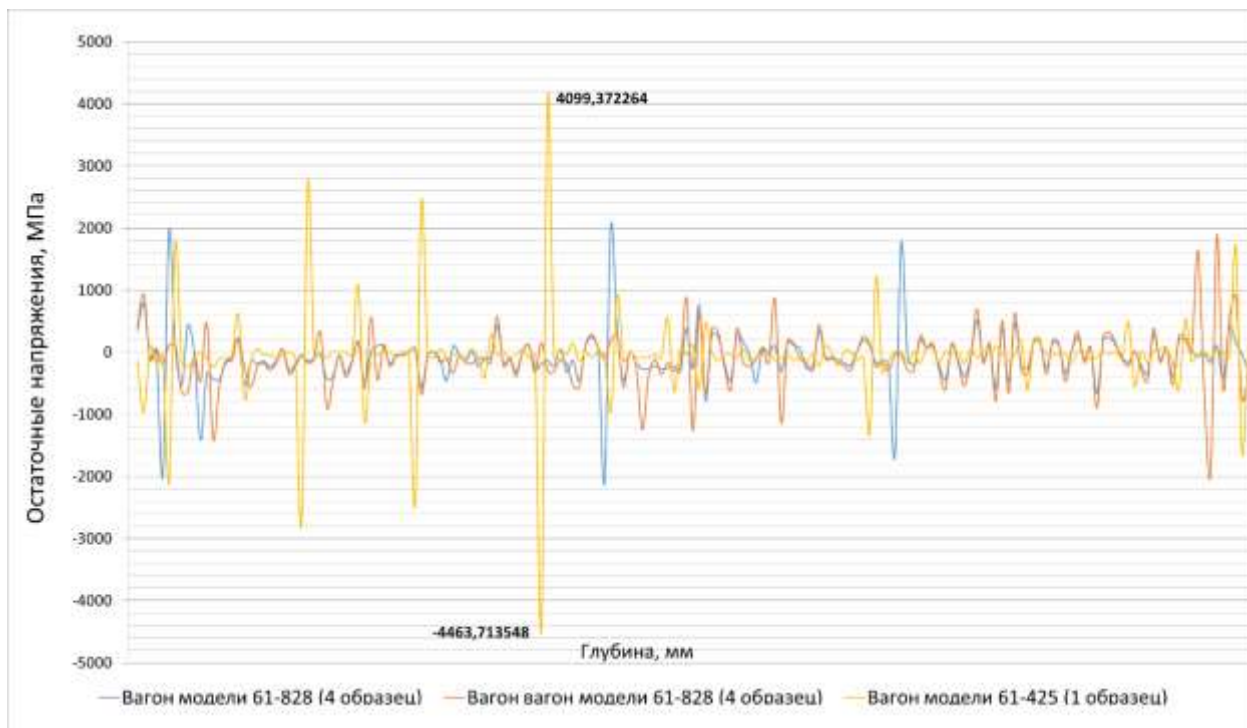
Участок «2» рисунка 3.15:



**Рисунок 3.37 – Распределение остаточных напряжений в фрагментах «2» всех хребтовых балках исследуемых моделей вагонов**

Наибольшие остаточные напряжения колеблются в знакопеременном интервале от  $-1899$  МПа до  $1205$  МПа. Наибольшие остаточные напряжения зафиксированы на хребтовой балке вагона модели 61-425.

Участок «3» рисунка 3.15:



**Рисунок 3.38 – Распределение остаточных напряжений в фрагментах «3» хребтовых балок всех исследуемых моделей вагонов**

Наибольшие остаточные напряжения колеблются в знакопеременном интервале от  $-4463$  МПа до  $4099$  МПа. Наибольшие остаточные напряжения зафиксированы на хребтовой балке вагона модели 61-425.

В целях оценки полученных в результате исследования вырезанных образцов из хребтовых балок вагонов моделей 61-828 и 61-425 для каждого исследованного участка балки (котловая и не котловая и средний участок) определяем дисперсию (среднеквадратическое отклонение) по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (3.42)$$

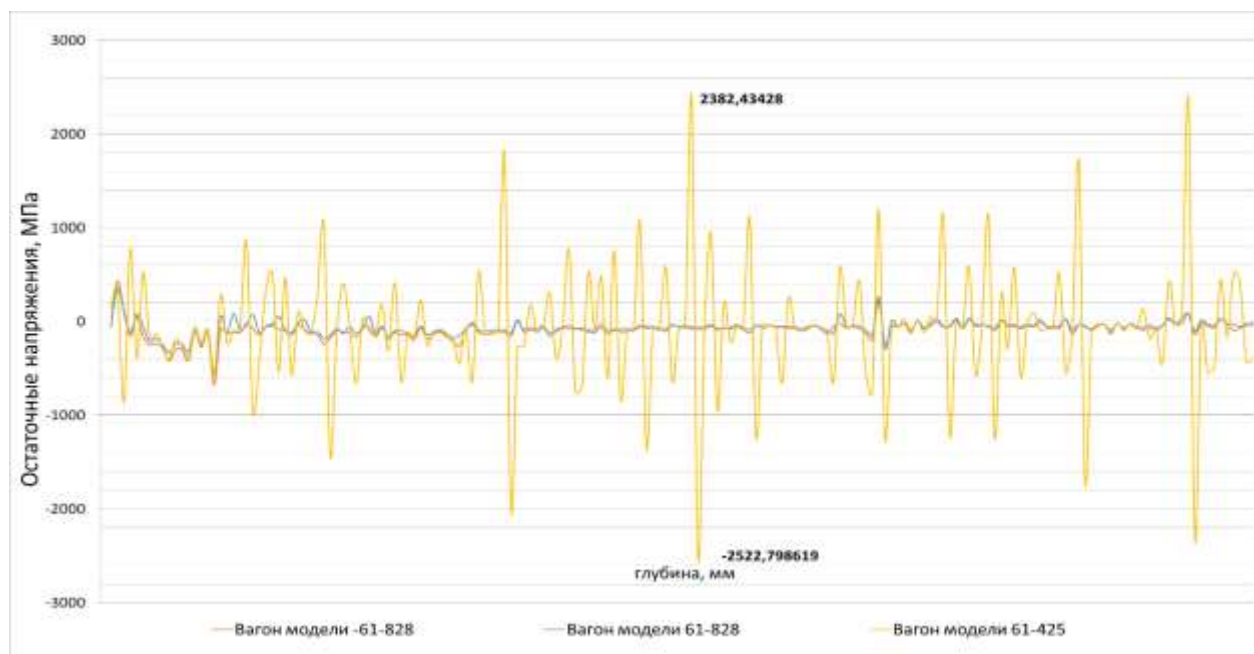
где:  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение;

$x_i$  – значение исследуемого участка;

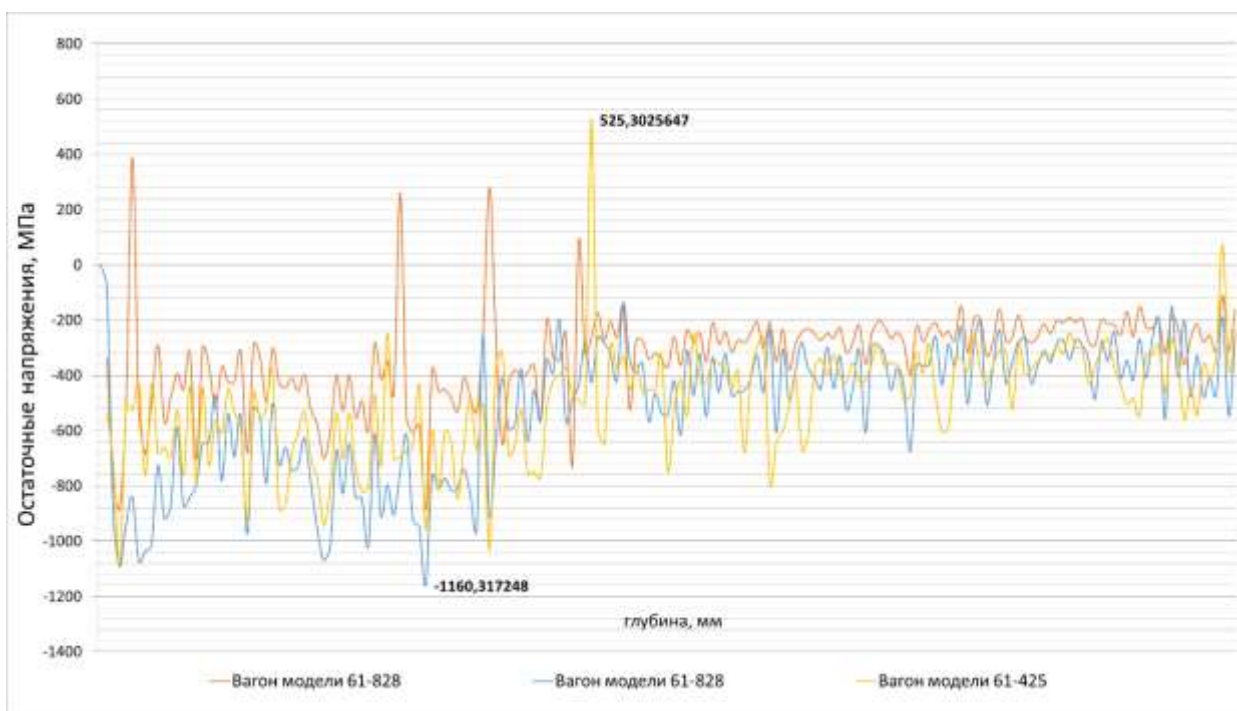
$\bar{x}$  – средняя арифметическая величина;

$n$  – объём статистической совокупности.

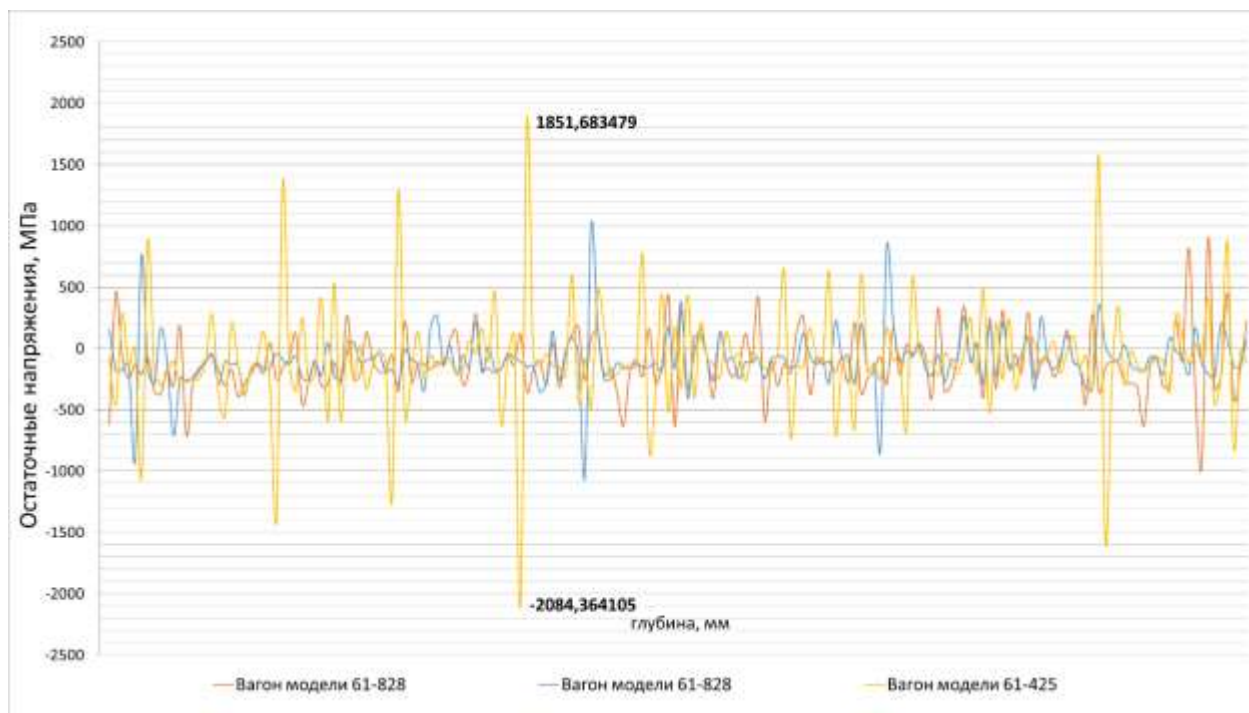
Структуризация среднеквадратических отклонений остаточных напряжений в исследуемых участках балок также показала их наибольшие знакопеременные значения в аналогичных зонах (рисунки 3.39–3.41).



**Рисунок 3.39 – Распределение среднеквадратического отклонения остаточных напряжений в фрагментах «1» хребтовых балок всех исследуемых моделей вагонов**



**Рисунок 3.40 – Распределение средневквдратического отклонения остаточных напряжений в фрагментах «2» хребтовых балок всех исследуемых моделей вагонов**



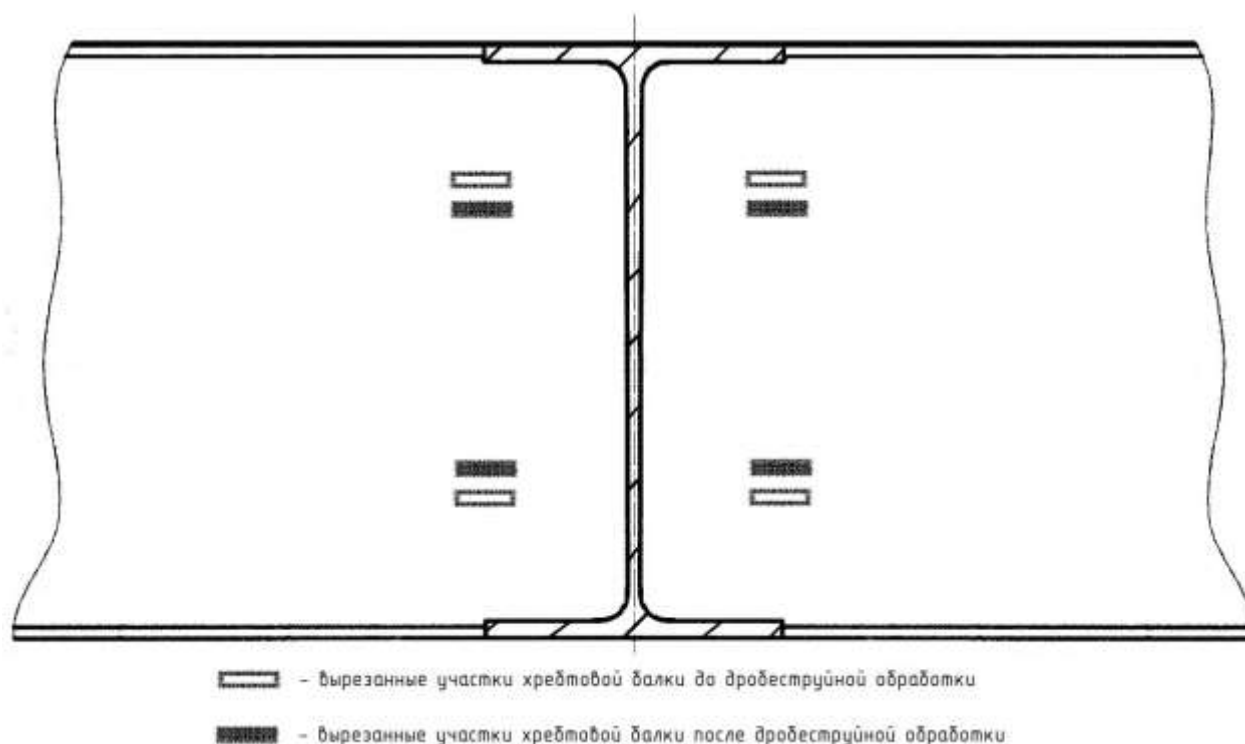
**Рис. 3.41 – Распределение средневквдратического отклонения остаточных напряжений фрагментов «3» хребтовых балок всех исследуемых моделей вагонов**

Участки с наибольшими остаточными напряжениями явились в районе приварке к шкворневой балке (фрагменты «1» и «3» рисунка 3.15). Участками с наибольшими значениями остаточных напряжений стали элементы, вырезанные с котловой и не котловой сторон вагона в районе приварки к

шкворневой балке. А в элементах, вырезанных в средней части хребтовой балки вагона (фрагмент «2» рисунка 3.15), у всех вагонов остаточные напряжения ниже, чем у фрагментов «1» и «3».

В целях определения возникновения остаточных напряжений во вновь изготавливаемой хребтовой балке после приварки двутавра шкворневой балки, а также после дробеструйной обработки поверхностного слоя проведено исследование наличия остаточных напряжений в металле, возникающих после проведения сварочных работ и после дробеструйной обработки поверхностного слоя.

Для проведения исследования произведена сварка швеллера хребтовой к двутавру шкворневой балок, изготовленных в соответствии с ГОСТ 5267-63 [36] (швеллер хребтовой балки № 30 В с сечением 7,5 мм, изготовленный из металла 09Г2С, двутавр шкворневой балки № 30 Б2 с толщиной стенки 6,5 мм, изготовленный из металла 09Г2С, рисунок 3.42).



**Рисунок 3.42 – Исследуемые участки хребтовой балки на наличие остаточной деформации**

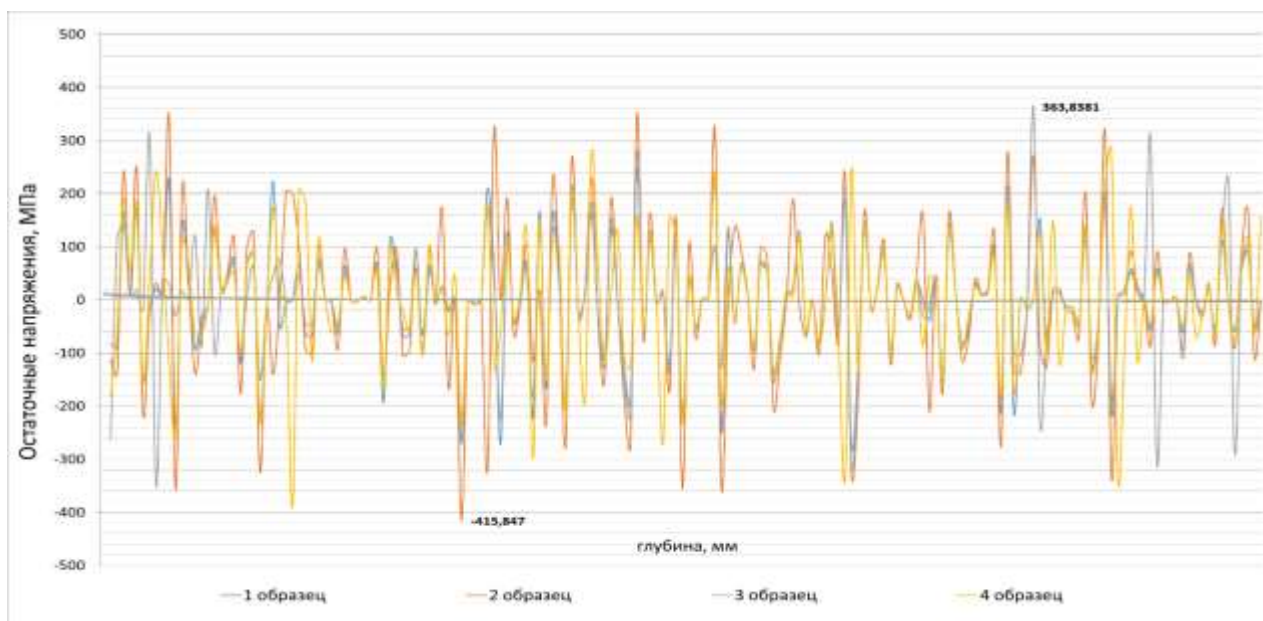


После сварки швеллера с двутавром полуавтоматической сваркой проволокой 1,2 св 08Г2С-О в среде защитных газов (80% CO<sub>2</sub> и 20% Ar) и остывании изделия [96] до температуры окружающей среды (22 С) произведено измерение твёрдости швеллера хребтовой балки и двутавра шкворневой балки в пяти точках каждого образца с занесением результатов в таблицу 3.15, далее осуществлена вырезка гидроабразивным способом четырёх фрагментов размером 5x60 мм из швеллера хребтовой балки на расстоянии 30 мм от сварного шва (рисунок 3.42).

**Таблица 3.15 – Твёрдость образцов после приварки шкворневой к хребтовой балке**

	Результаты НВ				
	1	2	3	4	5
Хребтовая балка	29	31	36	41	44
Шкворневая балка	41	38	49	28	37

Проведенным вытравливанием и измерением остаточных напряжений в зависимости от глубины травления каждого элемента по методу Н.Н. Давиденкова по методике ЦНИИТМАШ [4, 93, 102, 124] установлено, что наибольшие напряжения колеблются в знакопеременно интервале от –415 МПа (образец 2) до 354 МПа (образец 3). Данные результаты приведены на рисунке 3.43.

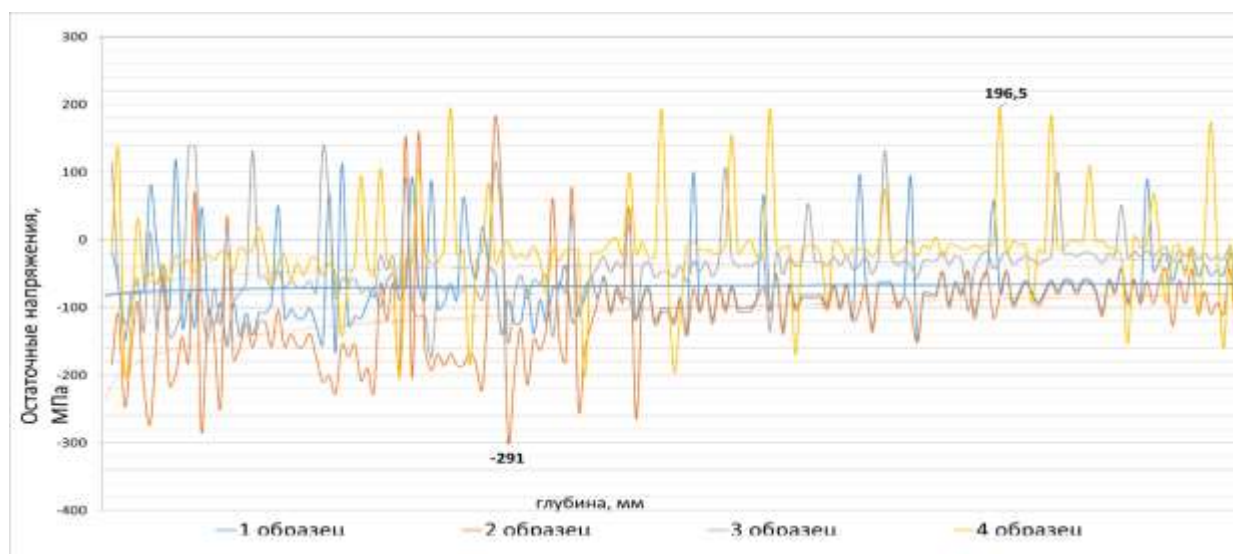


**Рисунок 3.43 – Распределение остаточных напряжений в зависимости от глубины травления хребтовой балки после её приварки к шкворневой балке**

После дробеструйной обработки изделия с использованием металлической дроби 0,3–0,5 мм произведено измерение твёрдости швеллера хребтовой и двутавра шкворневой балок в пяти точках с занесением результатов в таблицу 3.16 с последующей вырезкой гидроабразивным способом еще 4-х фрагментов размером 5x60 мм из швеллера хребтовой балки также на расстоянии 30 мм от сварного шва (рисунок 3.42) с последующим проведением измерения остаточных напряжений (рисунок 3.44).

**Таблица 3.16 – Твёрдость образцов после приварки шкворневой к хребтовой балке**

	Результаты НВ				
	1	2	3	4	5
Хребтовая балка	42	44	46	51	64
Шкворневая балка	58	43	62	55	45



**Рисунок 3.44 – Распределение остаточных напряжений в зависимости от глубины травления хребтовой балки после дробеструйной обработки**

По результатам исследования образцов после проведения дробеструйной обработки установлено, что наибольшие напряжения колеблются в знакопеременном интервале от –291 до 197 МПа.

В целях оценки среднеквадратического отклонения полученных в результате исследования вырезанных образцов до и после дробеструйной



обработки для данного участка хребтовой балки сравнительная дисперсия, рассчитанная по формуле 3.22, отражена на рисунке 3.45.



**Рисунок 3.45 – Среднеквадратическое отклонение результатов исследования распределения остаточных напряжений до и после дробеструйной обработки изделия**

По результатам проведённого исследования установлено, что твёрдость поверхностного слоя металла после дробеструйной обработки изменилась в сторону увеличения в среднем на 36 % в каждом элементе, а амплитуда и остаточные напряжения по результатам снизились в среднем в 1,5 раза.

Исходя из проведенных исследований установлено, что наибольшие среднеквадратические остаточные отклонения напряжений имеются во фрагментах вагона модели 61-425, изготовленного в 1980 году.

При исследовании наличия остаточных напряжений во вновь изготавливаемой хребтовой балке установлено, что дробеструйная обработка в 1,5 раза снижает их наличие в металле.

На основании изложенного с целью увеличения ресурса использования пассажирского вагона, в конструкцию рамы которой входит хребтовая балка, как в процессе назначенного срока службы вагона, так и в целях продления его на более длительный период необходимо обеспечить максимальную защиту основного несущего элемента вагона – хребтовой балки от воздействия на неё

окружающей среды и развития коррозии, в первую очередь, в местах приваривания к несущим поперечным элементам.

### 3.6 Исследование состояния поверхностного слоя в фрагментах хребтовых балок, выработавших нормативный ресурс

При визуальном осмотре образцов выявлено наличие лакокрасочного покрытия серого цвета (рисунки 3.46–3.48). В основном поверхность образцов окислена, цвет слоя окислов – рыжий.



где а – внешняя сторона вырезанного фрагмента хребтовой балки;  
б – внутренняя сторона вырезанного фрагмента хребтовой балки.

**Рисунок 3.46 – Фрагмент «1» хребтовой балки**



где а – внешняя сторона вырезанного фрагмента хребтовой балки;  
б – внутренняя сторона вырезанного фрагмента хребтовой балки.

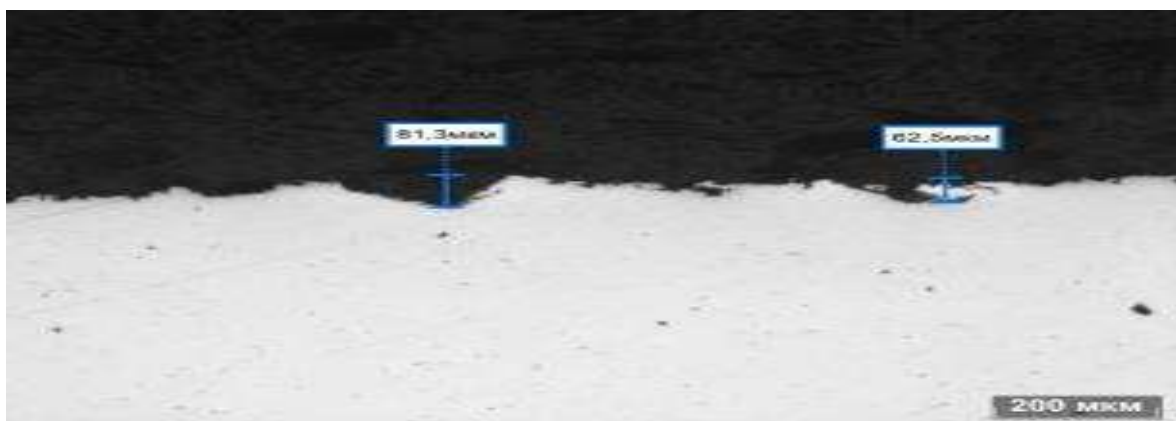
**Рисунок 3.47 – Фрагмент «2» хребтовой балки**



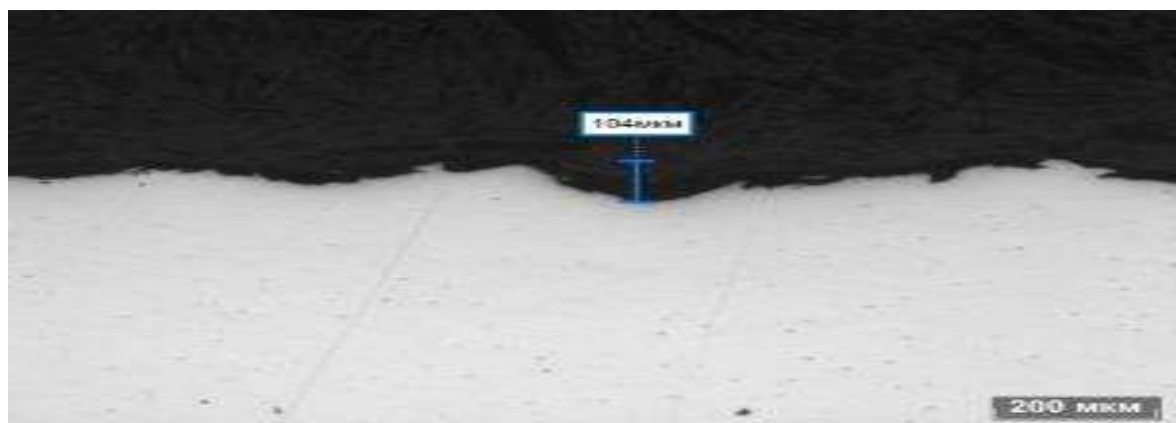
где а – внешняя сторона вырезанного фрагмента хребтовой балки;  
б – внутренняя сторона вырезанного фрагмента хребтовой балки.

**Рисунок 3.48 – Фрагмент «3» хребтовой балки**

При металлографическом исследовании обнаружено наличие коррозионных отложений в зонах с отсутствующим лакокрасочным покрытием (рисунки 3.49–3.51) и повреждение металла в результате общей коррозии. Максимальные повреждения обнаружены в образце 3 (элемент хребтовой балки вагона модели 61-425, 1980 года изготовления) с максимальной глубиной коррозионных язв 145 мкм, минимальные – в образце 1 (элемент хребтовой балки вагона модели 61-828, 1992 года изготовления) с максимальной глубиной коррозионных язв 80 мкм. В образце 2 (элемент хребтовой балки вагона модели 61-828, 1992 года изготовления) максимальная глубина коррозионных язв оценена в 105 мкм.

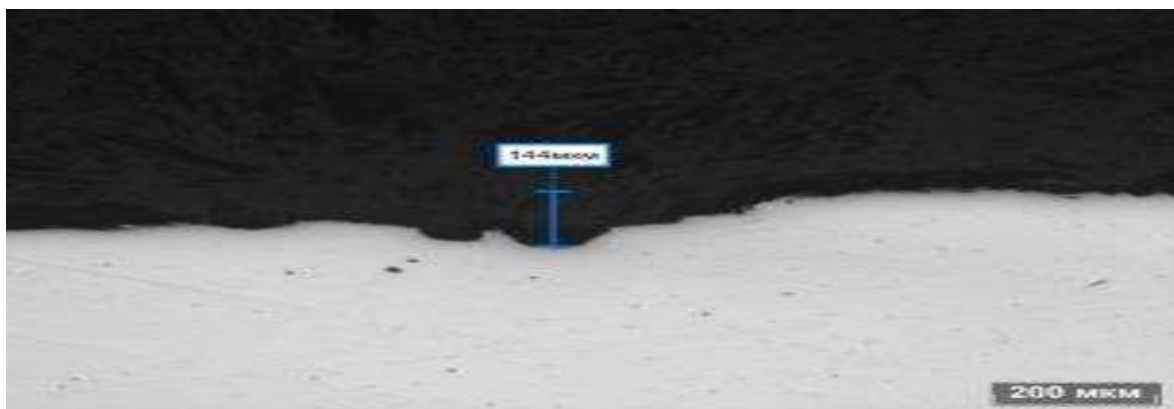


**Рисунок 3.49 – Профиль прокорродированной поверхности образца 1**



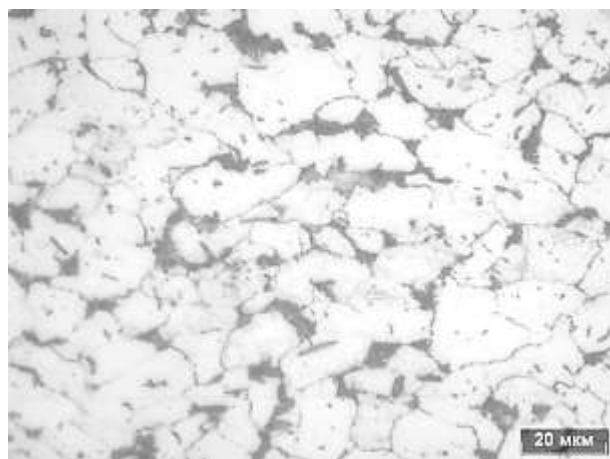
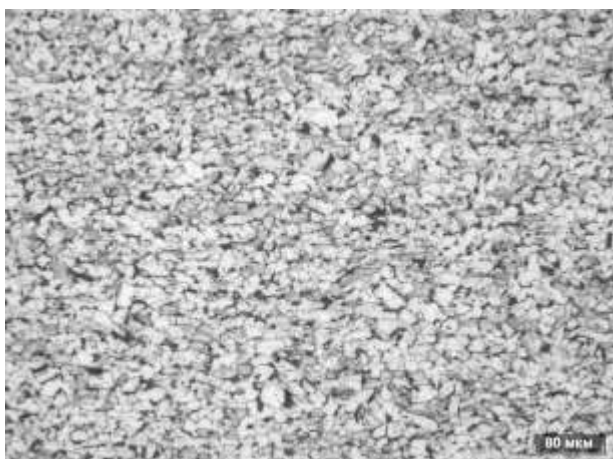
**Рисунок 3.50 – Профиль прокорродированной поверхности образца 2**



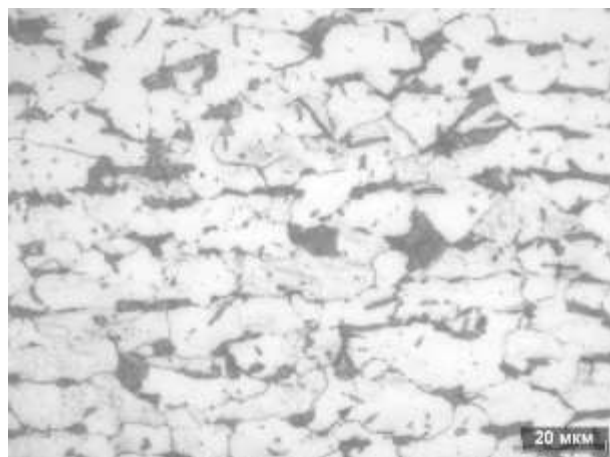
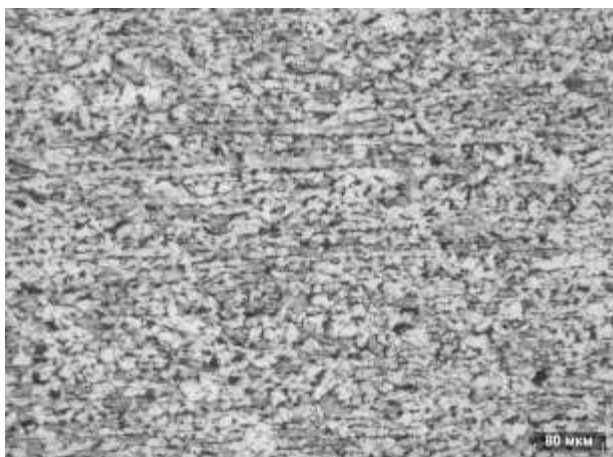


**Рисунок 3.51 – Профиль прокорродированной поверхности образца 3**

Микроструктура исследованных образцов представляет собой феррит + пластинчатый перлит (рисунки 3.52–3.54). Следует отметить, что в центральной части образцов выявляется выраженная феррито-перлитная полосчатость, в приповерхностной области полосчатость не выявляется.

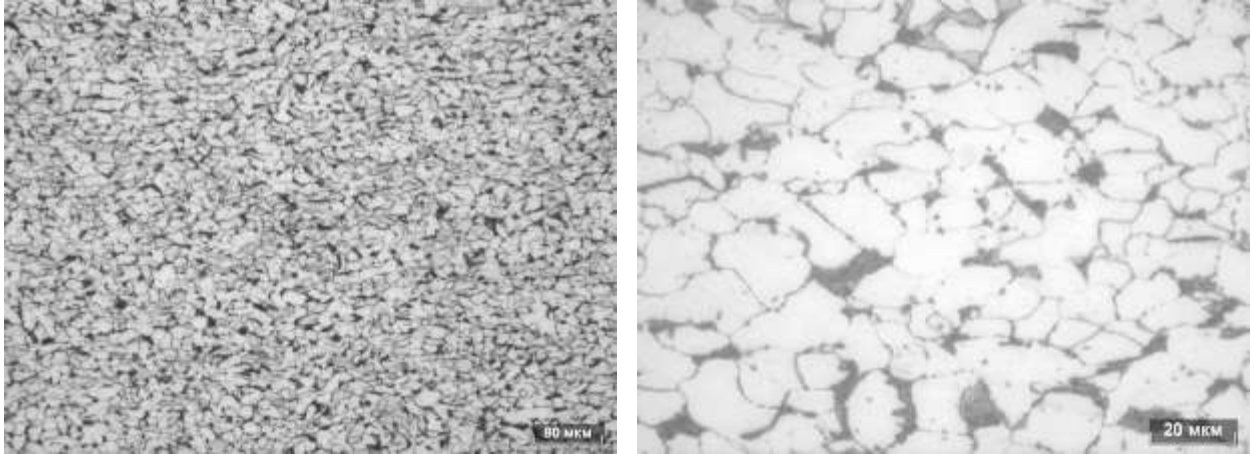


Микроструктура металла в приповерхностном слое

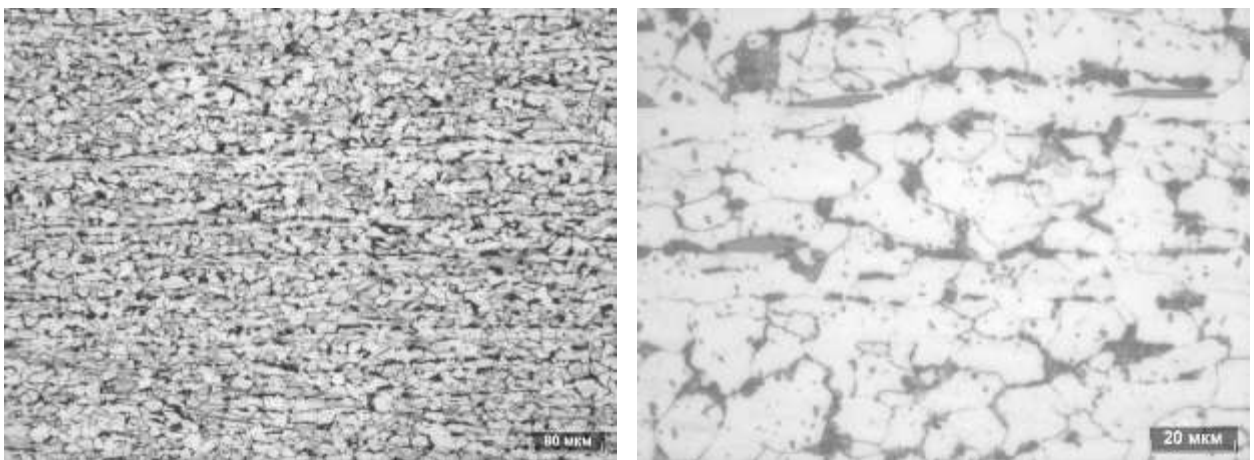


Микроструктура металла центрального участка

**Рисунок 3.52 – Коррозионные язвы на поверхности образца 1 при микроструктурном анализе**

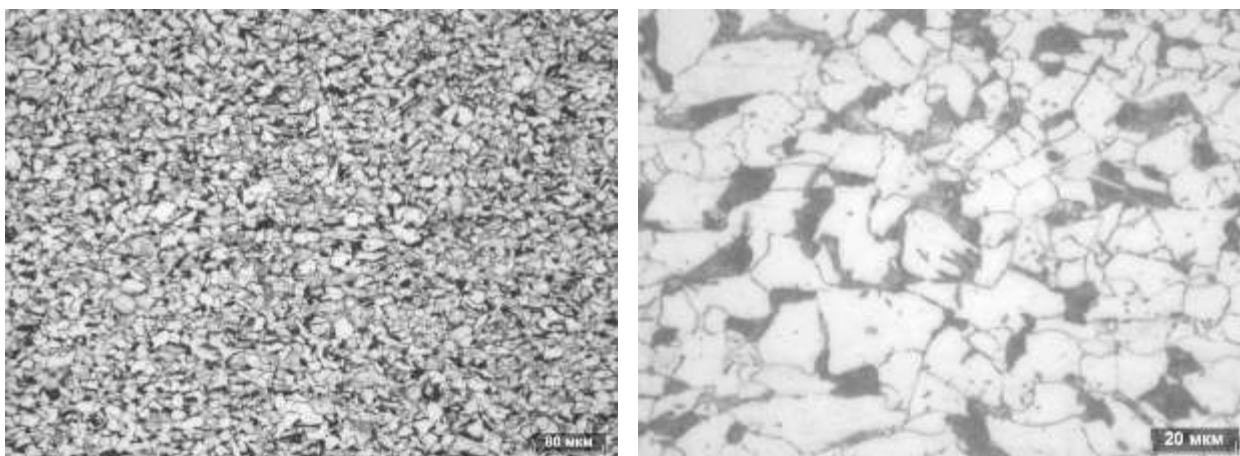


Микроструктура металла в приповерхностном слое

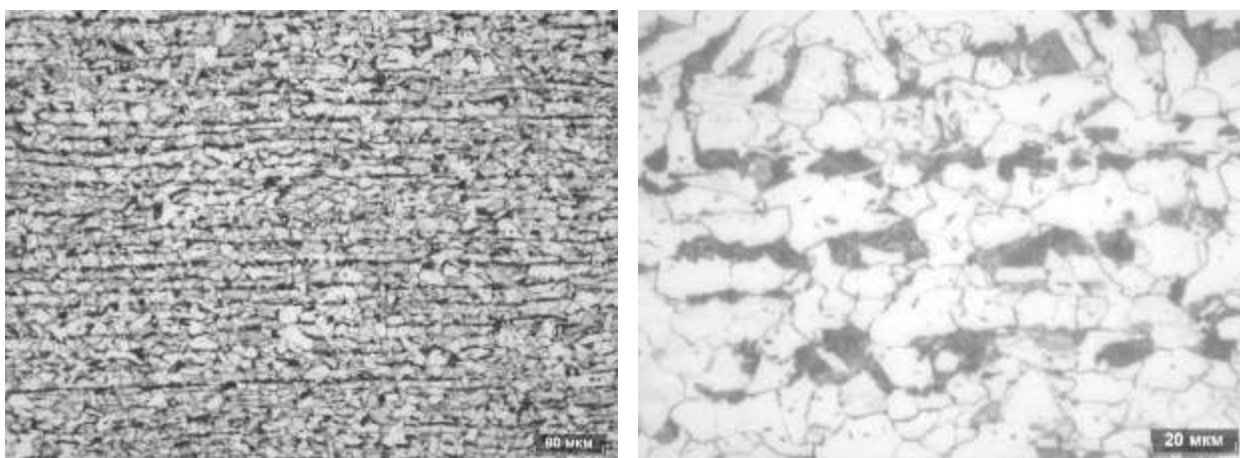


Микроструктура металла центрального участка

**Рисунок 3.53 – Коррозионные язвы на поверхности образца 2 при микроструктурном анализе**



Микроструктура металла в приповерхностном слое



Микроструктура металла центрального участка

**Рисунок 3.54 – Коррозионные язвы на поверхности образца 3 при микроструктурном анализе**

Результаты измерения толщин исследуемых образцов представлены в таблице. 3.17.

**Таблица 3.17 – Показатели толщин исследуемых образцов**

Образец	Толщина образца, мкм		
	средняя	минимальная	максимальная
1	6161	6087	6232
2	6257	6260	6279
3	5906	5778	5975

Таким образом, минимальная толщина металла от воздействия механико-коррозионных процессов выявлена в образце 3 (элемент хребтовой балки вагона модели 61-425, 1980 года изготовления) – остаточная толщина всех элементов соответствует требованиям нормативной документации (износ не более 18 % от номинальной толщины металла (5,33 мм)).

Следует отметить, что у вагонов одной модели (61-828) и одного года изготовления (1992), а также идентичного характера эксплуатации коррозионный износ металла неодинаков (образцы 1 и 2).

При анализе требований нормативной документации, действующих на протяжении жизненного цикла вагонов моделей 61-425 и 61-828, установлено, что вагоны подвергались механической очистке с последующим окрашиванием при проведении планового ремонта от 13 (образцы вагонов модели 61-828, 1992 года изготовления) до 18 раз (образец вагона модели 61-425, 1980 года изготовления).

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 54893-2012 [46] срок службы (долговечность) покрытий по защитным свойствам при соблюдении правил эксплуатации и ремонта ходовых частей должен быть не менее трёх лет. Однако фактическое использование пассажирских вагонов между окрашиваниями, а также исследование парка подвижного состава, изложенное в подразделе 3.4, требует поиска лакокрасочных материалов, а также технологии проведения подготовительных работ (перед окраской вагона), отвечающих следующим параметрам:

– обеспечение защитных свойств лакокрасочного покрытия не менее 6 лет (периодичность окрашивания пассажирских вагонов при использовании полиуретановой краски составляет 6 лет);

– минимизация проведения подготовительной механической обработки хребтовой балки перед её окраской.



### 3.7. Выводы по третьему разделу

1 Утонение несущих конструкций приводит к значительному увеличению напряжений в её элементах (как сжимающих, так и растягивающих);

2 Наиболее значительные напряжения при расчёте установлены в хребтовой и поперечных балках, а также в обвязке рамы;

3 Наличие повреждений от коррозионных пятен до коррозионных язв выявлены у всех исследованных вагонов, причем с увеличением срока службы вагона наблюдается рост коррозионных пятен по площади и глубине. Наиболее подверженными коррозионным воздействиям в хребтовой балке являются места соединений со шкворневыми и концевыми балками и в районе сварных соединений;

4 Механической деформации при нештатной ситуации (соударении вагонов) подвержены в первую очередь участки хребтовой балки со значительной коррозией;

5 При исследовании элементов хребтовых балок, выработавших свой нормативный срок службы вагонов, установлено, что все образцы соответствуют по ударной вязкости, пределу текучести, относительному изгибу и временному сопротивлению нормативным требованиям;

6 На разрушение хребтовой балки в значительной степени влияет образование коррозии из-за нарушения технологии нанесения лакокрасочного покрытия и долговечности краски, климатические перепады температуры, наличие конденсата, возникающего при эксплуатации вагона, а также механические воздействия при ремонте и обслуживании;

7 При вытравливании и измерении остаточных напряжений и величины деформации от глубины травления элементов по методу Н.Н. Давиденкова по методике ЦНИИТМАШ установлено, что наибольшие остаточные напряжения образуются в элементах хребтовой балки 1980 года изготовления;

8 При металлографическом исследовании наибольшие коррозионные язвы выявлены также в образце 1980 года изготовления;

9 При измерении толщины исследуемых образцов установлено, что вагоны одной модели, одного года постройки и идентичного характера эксплуатации имеют различную степень коррозионного износа, а также глубины коррозионных пятен. А в исследуемом элементе хребтовой балки 1980 года изготовления коррозионные язвы наиболее глубоки и составляют 144 мкм.

## **4 ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА**

### **4.1 Влияние дробеструйной обработки на формирование напряжений в поверхностных слоях хребтовой балки**

При установлении причин, влияющих на образование коррозии на элементы хребтовой балки, проведено исследование качества и равномерности нанесения лакокрасочного покрытия на хребтовую балку пассажирского вагона.

Для проведения данного исследования отобраны по одному образцу из трёх элементов швеллеров хребтовых балок исключённых вагонов.

В целях определения качества прилегания лакокрасочного покрытия к исследуемым элементам хребтовых балок в пяти произвольно выбранных точках на каждом образце с внешней стороны (сторона, подверженная воздействию окружающей среды) проведена проверка металла на твёрдость прибором ТЭМП-4.

После проверки на твёрдость и фиксации результатов осуществлена очистка образцов до металла.

После очистки от металла все образцы измерены на шероховатость и визуально проведен осмотр на наличие механических воздействий.

Проведено измерение образцов по толщине металла.

Далее после осуществления измерения толщины металла проведена дробеструйная обработка с использованием металлической дроби диаметром 0,3–0,5 мм и последующим измерением шероховатости, твёрдости, однородности и пористости металла. Также проведено повторное измерение толщины металла для определения изменения его толщины в результате влияния дробеструйной обработки на внешний слой металла.

После измерений проведено нанесение на образцы лакокрасочного материала с измерением твёрдости образцов.

Целью исследования являются определение состояния образцов хребтовой балки, окрашенных существующими методами, и сравнение с результатами проведения исследования по очистке существующих образцов дробеструйным методом с последующим нанесением лакокрасочного покрытия для исключения следующих факторов, влияющих на долговечность состояния металлических элементов балки, а именно:

- нанесение неравномерного лакокрасочного покрытия;
- окрашивание на ранее нанесённое лакокрасочное покрытие;
- очистка поверхности элементов хребтовой балки от продуктов, образовавшихся в результате ремонта (окалины, сварочного шлака, механических воздействий и т.д.).

В результате проведённого исследования получены следующие результаты.

При замере твердости образцов, вырезанных из различных балок фрагмента 1 (рисунок 3.12), получены результаты, а также среднеквадратическое отклонение, рассчитанное по формуле 3.22, занесённые в таблицу 4.1.

**Таблица 4.1 – Твёрдость образцов в исходном состоянии**

	Результаты НВ				
	1	2	3	4	5
Образец 1	20	20	27	24	28
Образец 2	46	59	50	60	45
Образец 3	50	20	42	55	51
Среднеквадратическое отклонение	35	33	35	42	37

Примечание: Образцы 1 и 2 – хребтовая балка вагона модели 61-828, изготовленная в 1992 году; образец 3 – хребтовая балка вагона модели 61-425, изготовленная в 1980 году.



Рисунок 4.1 – Образцы в исходном состоянии

После удаления с исследуемых образцов ранее нанесённого лакокрасочного покрытия повторно проведено измерение твёрдости поверхности по аналогичному количеству измерений.

Результаты значения твёрдости занесены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Твёрдость образцов после очистки покрытия

	Результаты НВ				
	1	2	3	4	5
Образец 1	24	35	39	43	38
Образец 2	48	42	50	43	58
Образец 3	53	53	50	63	53
Среднеквадратическое отклонение	38	38	40	44	44

При удалении ранее нанесённого лакокрасочного покрытия наблюдалось наличие нескольких слоёв ранее нанесённой краски, наличие коррозионных пятен и язв с площадью сечения до 30 % по площади образца. Между слоями лакокрасочного покрытия в ряде случаев наблюдались воздушные пузыри (адгезия). Также при очистке образцов от краски механическим способом очистить поверхность от коррозии и ранее нанесённых слоев лакокрасочного покрытия не удалось.

В результате измерения шероховатость поверхности образцов составила Rz 50-70.



Образец 1

Образец 2

Образец 3

Рисунок 4.2 – Образцы после очистки механическим способом

После проведения дробеструйной обработки с использованием металлической дроби диаметром 0,3–0,5 мм проведено измерение твёрдости, результаты измерений занесены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Твёрдость образцов после дробеструйной обработки

	Результаты НВ				
	1	2	3	4	5
Образец 1	27	38	40	42	37
Образец 2	47	44	52	47	61
Образец 3	54	57	51	58	63
Среднеквадратическое отклонение	38	41	42	43	48

По результатам измерений толщин образцов в трёх точках (средней части и по концам соответствующих образцов) получены следующие данные, занесённые в таблицу 4.4.

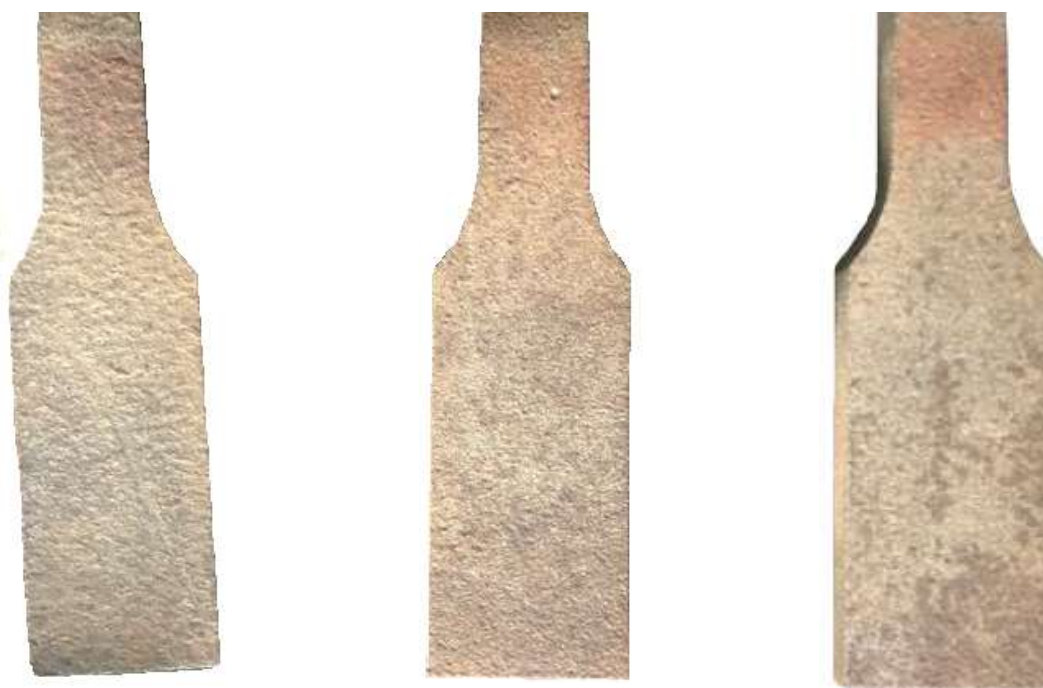
**Таблица 4.4 – Результаты измерения толщины образцов**

	Толщина образцов, мкм					
	1		2		3	
	а	б	а	б	а	б
Образец 1	6021	6013	6061	6051	6212	6203
Образец 2	6232	6224	6018	6010	6253	6244
Образец 3	6281	6272	5751	5743	5951	5941

а – измерение после очистки образцов от лакокрасочного покрытия и коррозии,  
б – измерение образцов после проведения дробеструйной обработки.

При исследовании образцов после проведения дробеструйной обработки установлено, что поверхность всех образцов полностью очищена от коррозии и ранее нанесённых слоёв лакокрасочного покрытия.

При измерении шероховатости поверхности очищенных образцов получены следующие результаты Rz 30–50.



Образец 1

Образец 2

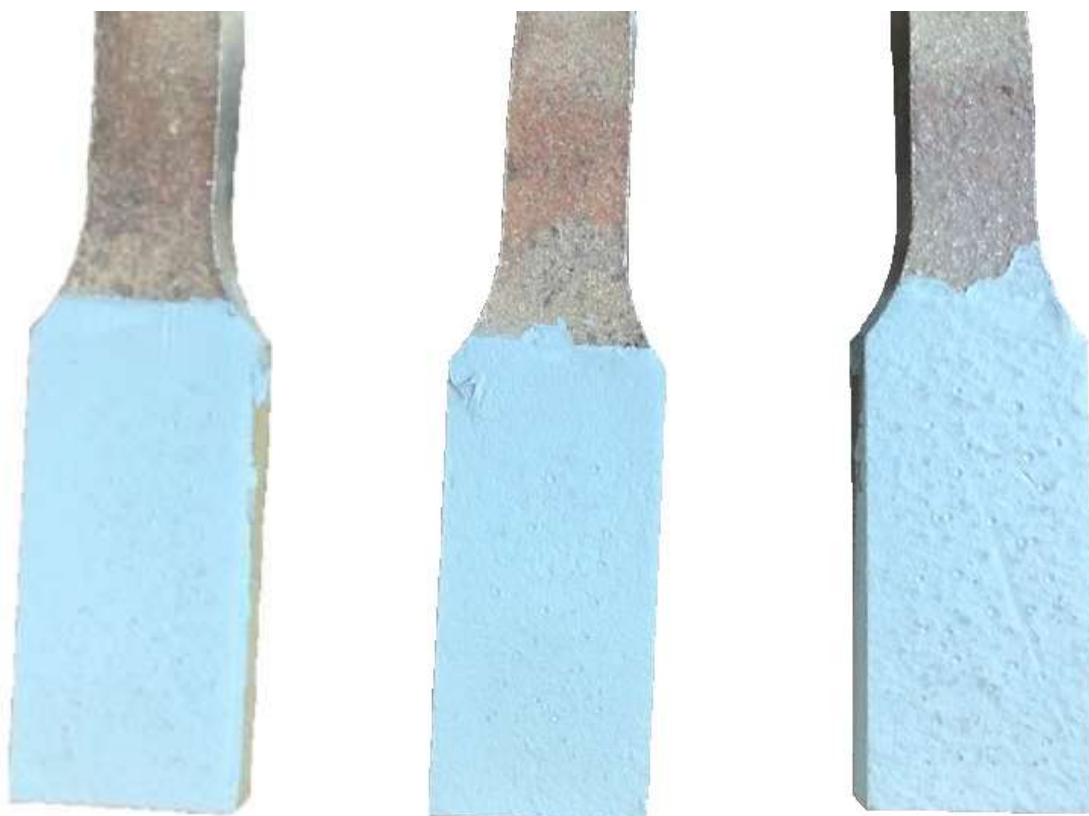
Образец 3

**Рисунок 4.3 – Образцы после дробеструйной обработки**

После дробеструйной очистки и измерения образцов проведено их окрашивание. В результате получены следующие данные, занесённые в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 – Твёрдость образцов после дробеструйной обработки

	Результаты НВ				
	1	2	3	4	5
Образец 1	492	499	482	484	480
Образец 2	487	498	484	495	495
Образец 3	490	481	491	471	486
Среднеквадратическое отклонение	424	427	421	419	422



Образец 1

Образец 2

Образец 3

Рисунок 4.4 – Образцы после окрашивания

Таким образом, по результатам проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

– разность полученных результатов твёрдости металла при измерении в исходном состоянии и после проведения дробеструйной обработки свидетельствует о более равномерном нанесении лакокрасочного покрытия, удалении пор и неровностей в металле, исключении ранее нанесённого лакокрасочного покрытия и непрокрасов;



– после дробеструйной обработки показатель шероховатости поверхности улучшился с Rz 50–70 до Rz 30–50, данный параметр достигнут благодаря проведению дробеструйной обработки образцов;

– после дробеструйной обработки твёрдость поверхностного слоя образцов незначительно изменилась, что свидетельствует о несущественном изменении структуры металла и исключении «хрупкости» и образования повышенных напряжений в обработанном слое;

– при проведении дробеструйной обработки удалось полностью очистить поверхности от коррозии и ранее нанесённого лакокрасочного покрытия.

#### **4.2 Расчёт циклической долговечности рамы пассажирского вагона модели 61-425, выработавшего предельный нормативный срок службы**

На основании результатов измерений и испытаний вагона произведены расчёты:

– остаточного срока службы вагона по степени коррозионного износа каждого элемента конструкции;

– циклической долговечности образца вагона для базовых элементов конструкции и определён срока службы вагона по результатам контрольных испытаний.

Расчёт остаточного срока службы вагона, полностью выработавшего продлённый срок службы (40 лет с момента постройки), выполнен в соответствии с Положением о продлении срока службы пассажирских вагонов, курсирующих в международном сообщении [103] по варианту установки элементов несущих конструкций кузова при постройке вагона и произведён от даты изготовления 01.01.1980 г. до даты проведения оценки фактической остаточной толщины металла (40,8 лет).

При проведении расчётов принимались допущения, что по каждому из элементов кузова вагона принято наименее благоприятное сочетание факторов для прогнозирования максимально возможной скорости коррозии:

- для определения остаточного срока службы использовались только параметры коррозионного износа элементов конструкции;
- справедлива линейная гипотеза развития коррозионных повреждений элементов кузова вагона;
- за максимально допускаемую величину коррозионного износа принимаются браковочные критерии, установленные при выпуске вагона из капитального ремонта (КР-1) [16].

Принятые допущения обеспечивают получение в расчётах максимально возможной скорости коррозионного износа. Следует понимать, что использованное в расчёте сочетание факторов крайне маловероятно, но с учётом допущений остаточный ресурс несущих конструкций в годах будет иметь минимально возможное значение, фактический же ресурс даже без учёта возможности замены элементов кузова при проведении капитальных и деповских ремонтов вагона будет значительно превышать полученные минимальные значения.

В качестве исходных данных для расчёта использовались результаты оценки толщины основных несущих конструкций кузова вагона по контрольным точкам, установленным в предыдущем разделе.

С учётом рекомендаций Положения о продлении срока службы пассажирских вагонов, курсирующих в международном сообщении [103] скорость коррозии и остаточный срок службы вагона по степени коррозионного износа элемента конструкции рассчитываются по нижеприведенным формулам.

Скорость коррозии (мм/год) определяется по формуле

$$V_{\text{кор}} = \frac{S_{\text{ном}} - S_{\text{ф}}}{T} \quad (4.1)$$

где:  $S_{\text{ном}}$  – номинальная толщина элемента, определённая в соответствии с конструкторской документацией, мм;

$S_{\phi}$  – фактическая толщина элемента конструкции по результатам измерений, мм;

$T$  – срок службы вагона пассажирского типа от даты проведения ремонта или изготовления, лет.

Остаточный срок службы элемента (лет) определяется по формуле

$$T_{\text{ост}} = \frac{S_{\phi} - S_{\text{min}}}{V_{\text{кор}}}, \quad (4.2)$$

где:  $S_{\text{min}}$  – минимально допустимая толщина элемента, установленная при выпуске вагона из ремонта КР-1 и гарантирующая коррозионный износ в пределах, обеспечивающих эксплуатацию вагона до следующего капитального ремонта.

Результаты расчёта остаточного срока службы пассажирского вагона исходя из скорости коррозионного износа каждого из элементов кузова приведены в таблице 4.6.

**Таблица 4.6 – Результаты расчёта остаточного ресурса несущих конструкции кузова вагона модели 61-425**

Наименование элемента кузова	Прогнозируемый остаточный срок службы вагона до достижения им браковочных критериев, при условии сохранения всех элементов кузова от изготовителя ( $T = 40,8$ лет), лет.
Концевая балка	58,2
Продольная боковая балка	60,9
Шкворневая балка	62,9
Хребтовая балка	56,0
Поперечная балка	127,1

По результатам выполненных расчётов остаточного ресурса вагона установлено, что минимальный срок службы вагона с учётом максимально возможных величин коррозионного износа до достижения одним из элементов вагона браковочных критериев, установленных при выпуске вагона из капитального ремонта (КР-1), составит 56 лет.

Проведен расчёт назначенного срока службы для базовых элементов конструкции по циклической долговечности образца вагона в соответствии с основными положениями Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества [13] и Норм для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [89], при этом принималось, что:

- усталостное повреждение или разрушение материала вагона происходили в основном при упругом деформировании, то есть расчёт производился по критерию многоциклового усталости;
- параметром, определяющим циклическую прочность, является коэффициент запаса сопротивления усталости;
- справедлива линейная гипотеза суммирования усталостных повреждений;
- накопление повреждений происходило при движении вагона;
- асимметрия цикла нагружения учитывалась не снижением предела выносливости материала, а увеличением амплитудных значений динамических напряжений путём приведения их к эквивалентному симметричному циклу, так как расчёт производился для установившегося режима нагружения.

В качестве исходных данных для расчёта использовались параметры напряжённо-деформированного состояния в контрольных точках (рисунок 4.5) конструкции вагона, определяемые расчётно-экспериментальными методами, и механические свойства материала, определяемые по справочным данным «Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества» [13]. Контрольные точки на основном металле вагона определены в зонах геометрических концентраторов напряжений, в соответствии с полученными исследованиями данные от динамических нагрузок представлены в таблице 4.6 (результаты сброса вагона с клиньев) и таблице 4.8 (продольные удары, действующие на вагон через автосцепку).

Таблица 4.6 – Результаты испытаний по сбросу с клиньев

К <sub>дв</sub>	Динамическое напряжения в исследуемых зонах, МПа						
	6*	8*	12*	4*	19*	1*	15*
0,44	6	6	7	12	16	11	7
	-7	-9	-8	-14	-15	-13	-9
	<b>10*</b>	<b>11*</b>	<b>14*</b>	<b>16*</b>	<b>13*</b>	<b>18*</b>	<b>9*</b>
	11	11	12	13	9	4	5
	-13	-13	-14	-15	-12	-6	-5
	<b>35*</b>	<b>7*</b>	<b>5*</b>	<b>29*</b>	<b>34*</b>	<b>31*</b>	<b>3*</b>
0,44	8	13	12	6	7	14	15
	-11	-13	-15	-7	-8	-17	-16
	<b>26*</b>	<b>25*</b>	<b>20*</b>	<b>21*</b>	<b>17*</b>	<b>23*</b>	<b>22*</b>
	5	13	9	7	20	19	5
	-7	-22	-11	-10	-33	-5	-6
	<b>12*</b>	<b>24*</b>	<b>33*</b>	<b>2*</b>	<b>30*</b>	<b>27*</b>	<b>28*</b>
	17	4	2	7	6	10	5
	-19	-6	-2	-7	-7	-12	-5

Примечание: \* – точки согласно карты контрольных точек, рисунок 4.5

Таблица 4.7 – Результаты динамических напряжений (соударение)

Сила, МН	Динамические напряжения в исследуемых зонах, МПа						
	6*	8*	12*	4*	19*	1*	15*
2,5	-21,4	-39,4	-29,4	-26,2	-17,6	-53	-65
	14,4	11	46,1	96,8	110,4	96,2	77,4
	<b>10*</b>	<b>11*</b>	<b>14*</b>	<b>16*</b>	<b>13*</b>	<b>18*</b>	<b>9*</b>
	-19,9	-186,3	-220,1	-214,5	-187,2	-24,2	-83,6
	73,1	38,7	56,7	47,9	27,1	3,9	5,4
	<b>35*</b>	<b>7*</b>	<b>5*</b>	<b>29*</b>	<b>34*</b>	<b>31*</b>	<b>3*</b>
	-77,3	-183,4	-226,8	-61,7	-13,1	-183,4	-141,7
	0,3	-0,5	0,4	1,6	22,7	4,8	6,2
	<b>26*</b>	<b>25*</b>	<b>20*</b>	<b>21*</b>	<b>17*</b>	<b>23*</b>	<b>22*</b>
	-14,8	-35,3	-29,6	-67,8	-127,7	-27,6	-145
	31,7	123,7	3,9	10,4	30,7	25,8	3,7
	<b>12*</b>	<b>24*</b>	<b>33*</b>	<b>2*</b>	<b>30*</b>	<b>27*</b>	<b>28*</b>
	-87,1	-88,9	-26	-146,6	-150,5	-86,5	-26
	13,3	12,5	6,2	6,9	5,8	12,4	11,4

Примечание: \* – точки согласно карты контрольных точек, рисунок 4.5

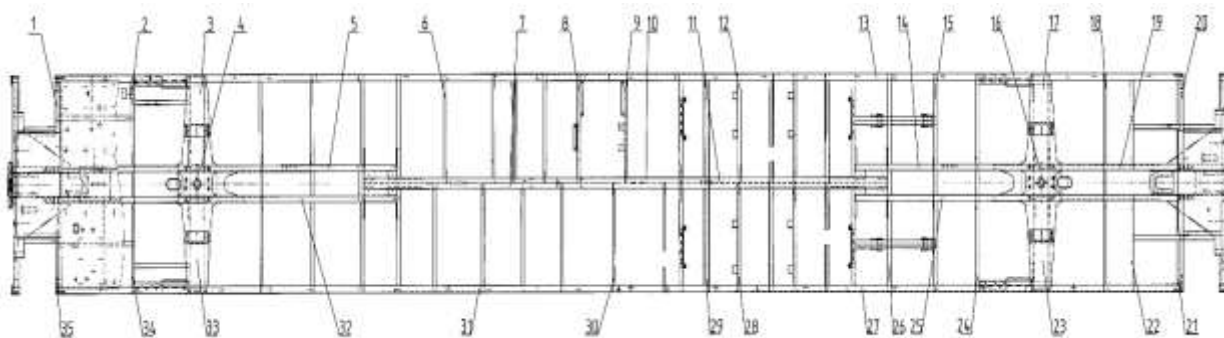


Рисунок. 4.5 – Карта контрольных точек

Оценка эксплуатационной нагруженности производилась экспериментальным путем с учетом нормативных показателей.

Нормативная функция распределения частот повторения продольных усилий согласно «Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества» [13], действующих на вагон через автосцепку, представлена в таблице 4.8. Нормативное количество циклов динамических напряжений ( $j$ ) от продольных сил, действующих на вагон через автосцепку за один год эксплуатации для пассажирских вагонов, по «Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества» [13] составило  $N_{cl} = 18\ 200$ .

Таблица 4.8 – Обобщенное распределение ударных продольных сил для проверки циклической долговечности несущей конструкции вагона

$j$	Диапазон усилий, МН	Частота повторения усилий в диапазоне, $P^j_j$
а	б	в
1	0,02–0,1	0,6880000
2	0,1–0,3	0,2080000
3	0,3–0,5	0,0780000
4	0,5–0,7	0,0160000
5	0,7–0,9	0,0060000
6	0,9–1,1	0,0320000
7	1,1–1,3	0,0006000
8	1,3–1,5	0,0001000
9	1,5–1,7	0,0000500
10	1,7–1,9	0,0000300

Продолжение таблицы 4.8

а	б	в
11	1,9–2,1	0,0000140
12	2,1–2,3	0,0000050
13	2,3–2,5	0,0000003
14	2,5–2,7	0,0000002

Нормативная функция распределения частот повторения коэффициентов динамики принимается равной функции распределения скоростей движения вагона согласно Норм для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [89] и представлена в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Нормативная плотность распределения скоростей

$k$	Средняя скорость интервала $\bar{V}_k$ , м/с	Среднее вероятное значение коэффициента динамики для скорости $\bar{V}_k$	Частота повторения скоростей в диапазоне, $P_j^{II}$
1	6,25	0,0290	0,02
2	13,75	0,0470	0,05
3	16,25	0,0542	0,07
4	18,75	0,0625	0,1
5	21,25	0,0708	0,11
6	23,75	0,0792	0,12
7	26,25	0,0875	0,15
8	28,75	0,0958	0,13
9	31,25	0,1042	0,10
10	33,75	0,1125	0,05
11	36,25	0,1208	0,04
12	38,75	0,1292	0,03
13	41,25	0,1375	0,02
14	43,75	0,1458	0,01

Нормативное количество циклов динамических напряжений от вертикальной динамики кузова при движении вагона за 1 год эксплуатации, согласно Норм для расчета и проектирования новых и модернизируемых

вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [89] определяется по формуле

$$N_{c2} = f_{\text{э}} T_p \quad (4.3)$$

$$f_{\text{э}} = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{f_{\text{ст}}}}, \quad (4.4)$$

где:  $f_{\text{э}}$  – центральная (эффективная) частота процесса изменения динамических напряжений,

$a$  – коэффициент, для кузова пассажирского вагона ( $a = 1,1$ ),

$g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>,

$f_{\text{ст}}$  – статический прогиб рессорного подвешивания вагона, м.

$$T_p = 365 \frac{10^3 \bar{L}_c}{\bar{V}}, \quad (4.5)$$

где:  $T_p$  – суммарное время действия динамических напряжений, вызванных колебаниями и вибрациями вагона при движении за 1 год эксплуатации,

$\bar{L}_c$  – среднесуточный груженный пробег вагона, км/сутки,

$\bar{V}$  – средняя техническая скорость движения вагона, м/с.

Среднесуточный пробег вагона составляет 700 км/сут, а средняя скорость движения  $\bar{V} = \sum V_i P_{Vi} = 25,375$  м/с согласно Норм для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [89]. Среднее значение общего коэффициента снижения предела выносливости ( $(\bar{k}_{\sigma})_k$ ) принимается в диапазоне от 2,4 до 4,8 для конкретной контрольной зоны.

Оценка усталостной прочности производится по коэффициенту запаса сопротивления усталости по формуле 4.6 согласно [88].

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,\text{э}}} \geq [n] \quad (4.6)$$



где:  $\sigma_{a,N}$  – предел выносливости (по амплитуде) для контрольной зоны при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения при базовом числе циклов,

$\sigma_{a,\varepsilon}$  – величина амплитуды динамического напряжения условного симметричного цикла, приведенная к базовому числу циклов  $N_0$ , эквивалентная по повреждающему воздействию реальному режиму эксплуатационных напряжений за расчетный срок службы,

$[n]$  – коэффициент запаса сопротивления усталости. Для рамы  $[n] = 1,9$ .

Расчётное значение  $\sigma_{a,N}$  определялось по формуле

$$\sigma_{a,N} = \overline{\sigma_{a,N}}(1 - z_p v_{\sigma_{a,N}}), \quad (4.7)$$

где:  $\overline{\sigma_{a,N}}$  – медианное значение предела выносливости контрольной зоны;

$z_p$  – квантиль распределения  $\sigma_{a,N}$ , соответствующий односторонней вероятности 95%,  $z_p=1,645$ ,

$v_{\sigma_{a,N}}$  – коэффициент вариации предела выносливости материала.  $v_{\sigma_{a,N}}=0,07$  для материала элементов вагона согласно Норм для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [89].

Значение  $\overline{\sigma_{a,N}}$  определяется по формуле

$$\overline{\sigma_{a,N}} = \frac{\overline{\sigma_{-1}}}{(\overline{k_{\sigma}})_k}, \quad (4.8)$$

где:  $\overline{\sigma_{-1}}$  – среднее (медианное) значение предела выносливости гладкого стандартного образца из материала по ГОСТ 2497-84 (ИСО 6892-84) [28] при симметричном цикле изгиба на базе  $N_0$ ,

$(\overline{k_{\sigma}})_k$  – среднее значение общего коэффициента снижения предела выносливости в выбранной контрольной зоне по отношению к пределу выносливости гладкого стандартного образца.

Величины амплитуд динамических напряжений, полученные в результате натурального эксперимента, приводились к эквивалентному симметричному циклу

по формуле (4.9) согласно Норм для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [89]:

$$\sigma_a = \sigma_a^{\text{эксп}} + \sigma_m \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B}, \quad (4.9)$$

где:  $\sigma_a$  – амплитуда динамического напряжения, приведённая к симметричному циклу, эквивалентная экспериментально полученному несимметричному,

$\sigma_a^{\text{эксп}}$  – амплитуда экспериментально полученного несимметричного цикла;

$\sigma_m$  – среднее напряжение цикла в контрольной зоне экспериментально полученного несимметричного цикла,

$\sigma_B$  – значение предела временного сопротивления материала в контрольной зоне.

Искомая величина долговечности по критерию усталостной прочности для выбранной зоны определяется по формуле

$$T_k = \frac{\left(\frac{\sigma_{a,N}}{[n]}\right) N_0}{N_{c1} \sum_j (\sigma_{aj}^I)^m P_j^I + N_{c2} \sum_k (\sigma_{ak}^{II})^m P_k^{II}} \quad (4.10)$$

где:  $m$  – показатель степени в уравнении кривой усталости в амплитудах. Для сварных конструкций из проката без упрочняющей обработки швов согласно Норм для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [89],

$T_k$  – искомая величина расчетного срока эксплуатации,

$N_{c1}, N_{c2}$  – числа циклов за 1 год эксплуатации для каждой из эксплуатационных нагрузок соответственно,

$\sigma_{aj}^I, \sigma_{ak}^{II}$  – амплитуды динамических напряжений, приведённые к симметричному циклу, эквивалентные экспериментально полученным несимметричным для различных эксплуатационных нагрузок и их диапазонов

(от вертикальных динамических нагрузок при движении в составе поезда и при нагружениях через сцепное устройство вагона, соответственно),

$P_j^I, P_k^{II}$  – вероятности появления амплитуд для различных эксплуатационных нагрузок с уровнями  $\sigma_{aj}^I, \sigma_{ak}^{II}$ ,

$N_0$  – базовое число циклов.

В качестве расчётного срока эксплуатации принималась минимальная из величин  $T_k$  для контрольных зон,  $T_{k > \min}$ .

Полученные результаты циклической долговечности для каждой из исследуемых точек (рисунок 4.5) представлены в таблице 4.10.

**Таблица 4.10 – Полученные результаты циклической долговечности**

Номер точки	Долговечность, лет	$(\overline{k_\sigma})_k$	$n$
а	б	в	г
7	214,9	2,4	2,15
5	98,9	2,4	1,77
10	116,2	2,4	1,84
11	271,2	2,4	2,28
4	56,6	2,4	1,61
14	101,9	2,4	1,79
19	103,7	2,4	1,8
16	56,3	2,4	1,60
25	101,9	2,4	1,79
32	98,6	2,4	1,77
13	10051,8	2,4	5,59
27	561,3	2,4	2,72
31	498,0	2,4	2,64
3	1280,7	2,4	3,35
17	1391,7	2,4	3,57
6	1292,4	2,4	3,35
23	1137,2	2,4	3,24
33	995,0	2,4	3,15
1	2856,8	2,4	4,28
20	2921,3	2,4	4,31
21	4223,1	2,4	4,66
35	5304,7	2,4	4,79
2	1340,7	2,4	3,41

а	б	в	г
6	1487,7	2,4	3,48
8	1287,4	2,4	3,35
9	1145,2	2,4	3,24
12	1621,4	2,4	3,5
15	1874,5	2,4	3,62
18	1102,6	2,4	3,14
22	1429,2	2,4	3,48
24	1723,4	2,4	3,52
26	1954,2	2,4	3,65
28	1120,9	2,4	3,14
29	1329,1	2,4	3,41
30	2014,4	2,4	3,68
34	1521,5	2,4	3,49

На основании полученных результатов циклическая долговечность образца вагона модели 61-425, прошедшего капитально-восстановительный ремонт и полностью выработавшего продлённый срок службы (40 лет с момента постройки), составила для базовых элементов конструкции не менее 56 лет (с момента постройки вагона).

С учётом того, что образцом вагона модели 6-425 выработан срок службы (40 лет с момента постройки), минимальная величина остаточного срока службы вагона составляет 16 лет.

### **4.3 Изучение эксплуатационных свойств предлагаемого покрытия**

В целях определения оптимального лакокрасочного покрытия проведены сравнительные лабораторные исследования с основным типом краски, применяемой при окрашивании подвагонного оборудования – с грунт-эмалевой краской ЯрЛИСоат 7130 ЖД.

В процессе проведенного сравнительного исследования в лабораторных условиях на соответствие требованиям ГОСТ 9.401-18 [41] получены результаты, занесенные в таблицу 4.11.

**Таблица 4.11 – Сравнительные лабораторные исследования лакокрасочных покрытий СВАН-500М и ЯрЛИсоат 7130 ЖД**

Показатель	Технические требования	СВАН-500М	ЯрЛИсоат 7130 ЖТ
а	б	в	г
Внешний вид		Однородная вязкая жидкость без запаха	Грунт-эмаль
Внешний вид покрытия	–	Шелковистая матовая	Матовая
Растворитель	–	Вода	Органический растворитель
Разбавитель	–	Вода	Органический растворитель
рН	6,5–9,5	8,0–10,0	6,6–8,0
Содержание сухого вещества, %	50,0	57,0–62,0	45–60
Условная вязкость по ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм при температуре (20±2) °С, сек	14	50–100	50–110
Степень перетира, мкм	70	менее 20,0	менее 40,0
Время высыхания до степени 3 при температуре 20 °С, ч	1 ч	менее 1ч	2 ч
<b>Покрытие</b>			
Укрывистость, гр/м <sup>2</sup> , сухая пленка	100	60–80	менее 100
Смываемость плёнки гр/м <sup>2</sup>	2,0–3,5	менее 2,0	-
Адгезия к металлу, балл	–	1	1
Твёрдость по Кёнигу, отн. ед.	–	более 0,23*	не менее 0,2

а	б	в	г
Стойкость покрытия к статическому действию воды при $t = 20 \pm 2$ °С, не менее, ч	412	более 500 ч	480 ч
Стойкость покрытия к статическому действию 3 % р-ру NaCl при $t = 20 \pm 2$ °С, не менее, ч	—	При толщине слоя 60 мкм = 48 ч При толщине слоя 100 мкм = 72 ч При толщине слоя 160 мкм = более 400 ч	480 ч
Прочность плёнки при ударе на приборе У-2, н/м, см	—	50	50
Свободная плёнка			
Нагрузка при разрыве, МПа	—	2,0–3,0	—
Удлинение, %	—	150	—
Доступность			
Меры предосторожности	—	Краска относится к малоопасным веществам, пожаро-, взрывобезопасна. Класс опасности – 4. Предельно-допустимые концентрации паров не регламентируются.	—
Очистка инструмента	—	Инструмент моется водой или моющими растворами немедленно после окончания работ	—
* данную твердость набирает в течение не менее 14 дней (при температуре $20 \pm 2$ °С)			

Кроме того, резиновая водоразбавляемая краска СВАН-500М имеет следующие преимущества в отличие от разрешённых к применению в соответствии с ГОСТ 9.401-2018 [31], а именно:

- стойкость лакокрасочного покрытия к деформациям и вибрации;
- отсутствие вредных выбросов при производстве работ;
- отсутствие органических растворителей и разбавителей;
- возможность нанесения на окисленную поверхность (ЯрЛИСоат 7130ЖТ применяется только на не окисленную поверхность чугуна и стали);
- отсутствие необходимости использования грунтового слоя;
- экономия при проведении окрасочных работ на 15 % ниже, чем при использовании грунт-эмалевой краски.

Процесс окраски не требует использования дополнительных средств индивидуальной защиты для персонала, так как данная краска не выделяет токсичных паров, также не требует применения растворителей и вспомогательных материалов.

Кроме того, данное лакокрасочное покрытие СВАН-500М при применении водоразбавляемых материалов в атмосферу выделяет только водяные пары в количестве около 400 г/кг, что отвечает общей тенденции снижения углеводородного следа при производстве лакокрасочных работ. Данная краска относится к 4 классу опасности, что снижает вредность производства окрасочных работ для работников дробеструйно-окрасочных комплексов. Из-за низкой себестоимости данной краски снижается себестоимость окрасочных работ самого вагона при ремонте.

На основании полученных результатов по сравнительному исследованию лакокрасочных покрытий можно сделать вывод, что резиновая водоразбавляемая краска СВАН-500М должна применяться для защиты от влияния внешней среды и коррозии металлоконструкций (в частности, хребтовой балки и рамы вагона), а также от ржавления при интенсивной эксплуатации пассажирского вагона в разных климатических зонах.

Основные характеристики грунт-эмали СВАН-500М приведены в таблице 4.12.

**Таблица 4.12 – Характеристики грунт-эмали СВАН-500М**

Наименование показателя	Значение
Массовая доля нелетучих веществ, %	57,0–62,0
рН	8,0–10,0
Условия вязкости по ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм при температуре (20±0,5) °С, сек	50–100
Время высыхания до степени 3 при температуре (20±2) °С, ч, не более г/см <sup>3</sup>	1
Внешний вид покрытия	Матовый
Адгезия к металлу, балл	1
Твердость по Кёрингу, отн. ед., не менее	0,15
Стойкость покрытия к статистическому воздействию воды при температуре (20±2) °С, ч, не менее	120
Стойкость покрытия к статическому воздействию 3 % раствора NaCl при температуре (20±2) °С, ч, не менее	72

Данной краской проведено экспериментальное окрашивание хребтовой балки вагона модели 61-4186, который курсирует в настоящее время на полигоне Москва – Воркута, и установлена подконтрольная эксплуатация за данным вагоном.

#### **4.4 Исследование влияния дробеструйной обработки поверхностного слоя хребтовой балки на развитие коррозии**

Для проведения данного исследования из швеллера хребтовой балки, изготовленной из металла 09Г2С гидроабразивным способом, вырезано 15 образцов размером 20x30 мм, из которых 6 образцам проведена дробеструйная обработка поверхностного слоя металла. Торцевые поверхности обработаны лаком для исключения попадания оборотной воды [44].

В целях оценки развития коррозии отобраны по 3 образца без дробеструйной обработки и по 2 образца с дробеструйной обработкой



поверхностного слоя для их помещения в оборотную воду (0,3 г  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; 0,4 г  $\text{NaCl}$ ; 1 литр дистиллированной воды) по ГОСТ 9.912-89 [44]. По результатам воздействия оборотной воды [44] на образцы после выдерживания в диапазонах 10, 20 и 30 часов испытаний каждой партии образцов проведено измерение убыли их массы.

Данные по результатам измерения массы образцов в исходном состоянии занесены в таблицу 4.13.

**Таблица 4.13 – Исходная масса образцов**

Образец	Масса без лака, г	Масса с лаком, г	
Без дробеструйной обработки	1	29,6350	29,6956
	2	29,6297	29,6921
	3	29,0481	29,1118
	4	29,0633	29,1328
	5	29,5830	29,6558
	6	30,3461	30,4252
	7	29,8658	29,9388
	8	29,7394	29,7955
	9	29,1862	29,2605
С дробеструйной обработкой	10	28,6844	28,7203
	11	29,9719	30,0061
	12	29,3761	29,4426
	13	30,1526	30,2081
	14	29,3941	29,4520
	15	29,0080	29,0815

После определения исходной массы образцы 1, 2, 3, 10, 11 полностью помещены в оборотную воду на 10 часов, образцы 4, 5, 6, 12, 13 полностью помещены в оборотную воду на 20 часов, а образцы 7, 8, 9, 14, 15 полностью помещены в оборотную воду на 30 часов. По результатам нахождения соответствующих образцов в оборотной воде соответственно 10, 20 и 30 часов произведена их сушка при атмосферном давлении и комнатной температуре в течение 24 часов соответственно каждой партии и последующим измерением убыли их массы. Данные по результатам измерения, изменения массы каждого, разница масс средняя убыль сформированы в таблице 4.14 и на рисунке 4.6.

Таблица 4.14 – Убыль массы

Образец		Масса с лаком, г	Масса после испытаний, г	Средняя убыль, г
Без дробеструйной обработки	1	29,6956	29,6925	0,0028
	2	29,6921	29,6895	
	3	29,1118	29,1091	
	4	29,1328	29,1308	0,00263
	5	29,6558	29,6528	
	6	30,4252	29,4223	
	7	29,9388	29,9351	0,00387
	8	29,7955	29,7916	
	9	29,2605	29,2565	
С дробеструйной обработкой	10	28,7203	28,7196	0,00085
	11	30,0061	30,0051	
	12	29,4426	29,4414	0,00125
	13	30,2081	30,2068	
	14	29,4520	29,4502	0,0021
	15	29,0815	29,0791	

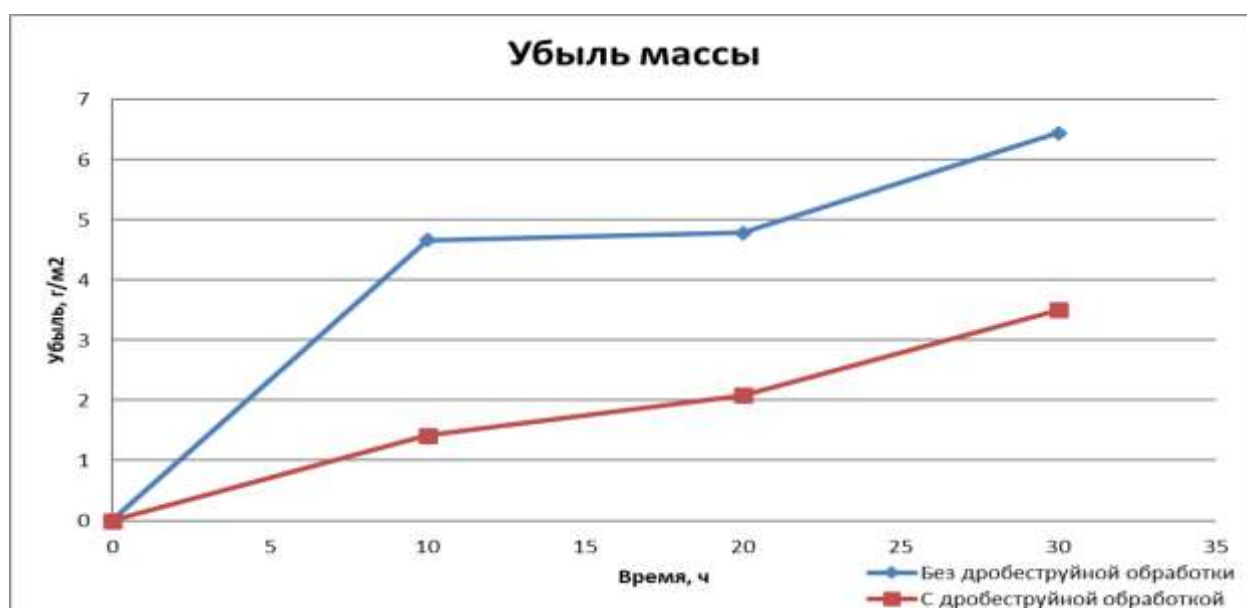


Рисунок 4.6 – Образцы с различной обработкой после 10-, 20- и 30-часовых испытаний

По результатам исследования можно сделать вывод, что убыль массы с увеличением продолжительности выдержки увеличивается, при этом на металле с дробеструйной обработкой поверхностного слоя убыль меньше, чем на металле без обработки.

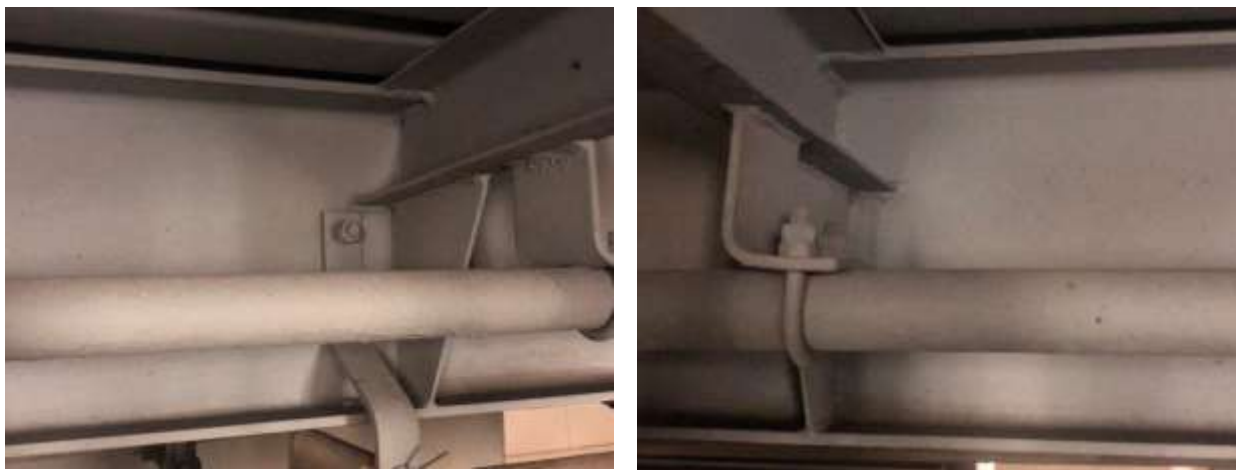
#### **4.5 Экспериментальное нанесение водоразбавляемой краски по металлу на участки хребтовой балки вагона модели 61-4186**

Для формирования типовой технологии подготовки и нанесения лакокрасочного покрытия проведен эксперимент по окраске в условиях дробеструйно-окрасочного комплекса пассажирского вагонного депо Москва-3 путем окраски элементов хребтовой балки вагона модели 61-4186.

При проведении эксперимента были поставлены следующие задачи:

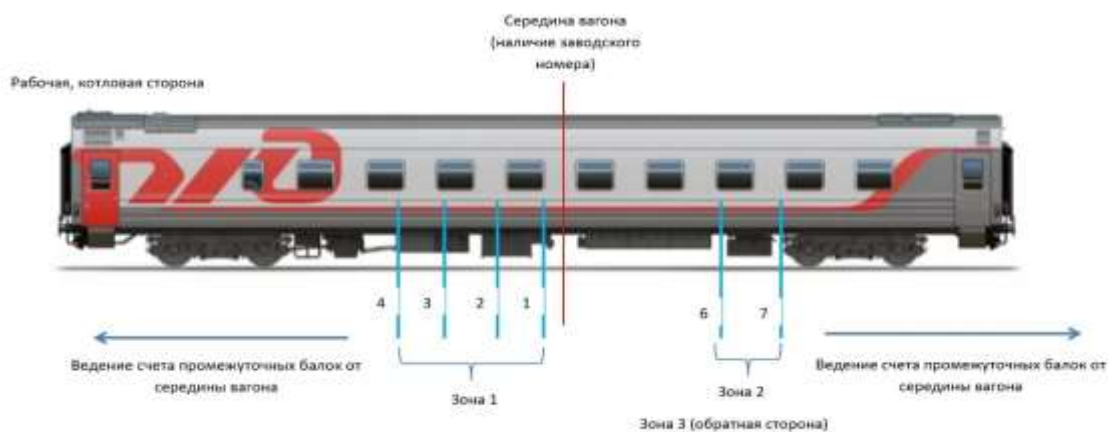
- определить качество подготовки вагона к окраске после проведения ремонта на вагоноремонтном структурном подразделении;
- провести сравнение качества очистки элементов хребтовой балки дробеструйным и механическим методами;
- провести определение и сравнение твердости и шероховатости поверхности хребтовой балки вагона после механической и дробеструйной очистками;
- определить возможность нанесения лакокрасочного покрытия СВАН-500М на ранее нанесенную краску;
- провести сравнение качества нанесения лакокрасочного покрытия на участки хребтовой балки при проведении эксперимента.

При поступлении вагона на окрасочную позицию дробеструйно-окрасочного комплекса установлено, что лакокрасочное покрытие подвагонного оборудования, рамы и несущих конструкций от ранее нанесенного лакокрасочного покрытия не очищено (рисунок 4.7).



**Рисунок 4.7 – Состояние хребтовой балки пассажирского вагона модели 61-4186 при поступлении в окрасочный комплекс**

После постановки вагона на позицию дробеструйной очистки кузова вагона проведены работы по очистке участков хребтовой балки с левой и правой сторон вагона от ранее нанесённого лакокрасочного покрытия (рисунок 4.8), при этом зоны 1 и 2 – участки очистки хребтовой балки от ранее нанесенного лакокрасочного покрытия методом дробеструйной обработки, зона 3 – участок очистки хребтовой балки механическим методом.



**Рисунок 4.8 – Схематическое расположение мест очистки хребтовой балки**

При проведении дробеструйной обработки участков зон 1 (1850x300 мм) и 2 (1300x300 мм) установлено, что лакокрасочное покрытие полностью удалено с поверхности металла, включая сварные соединения, поверхность после обработки гладкая, матовая (рисунок 4.9).

Время, затраченное на проведение дробеструйной обработки зоны 1, составило 14 мин ( $660 \text{ мм}^2/\text{с}$ ).

При проведении очистки механическим способом участка зоны 3 ( $400 \times 300 \text{ мм}$ ) установлено, что в районе сварных швов добиться полного, а также равномерного удаления лакокрасочного покрытия не удалось из-за отсутствия свободного доступа очистительной машинки, при очистке поверхности от ранее нанесённого лакокрасочного покрытия также происходит утонение металла хребтовой балки (рисунок 4.9).

Время, затраченное на проведение механической обработки зоны 3, составило 45 мин ( $44 \text{ мм}^2/\text{с}$ ).



Зона 1 после дробеструйной  
обработки

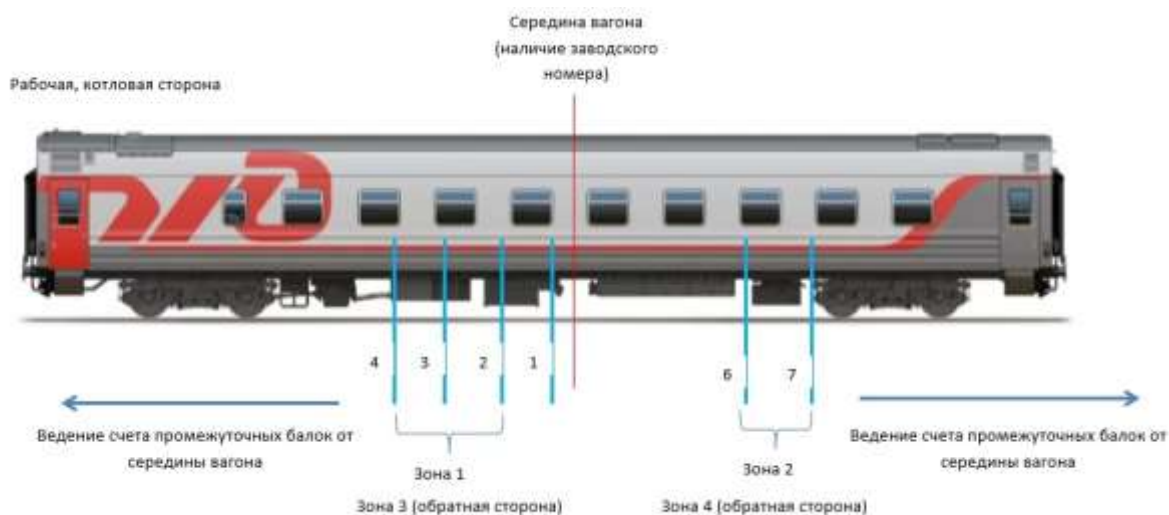


Зона 3 после механической очистки

**Рисунок 4.9 – Состояние элементов хребтовой балки после обработки механическим и дробеструйным способами**

По результатам очистки зон 1, 2, 3 от ранее нанесенного лакокрасочного покрытия установлено, что твердость металла после проведения дробеструйной очистки составила 160 НВ, шероховатость поверхности 38 мкм, а после механической обработки твердость составила 153 НВ, шероховатость 11 мкм.

После проведения подготовленных работ проведено окрашивание хребтовой балки вагона модели 61-4186 в 4-х зонах (рисунок 4.10).



**Рисунок 4.10 – Участки нанесения лакокрасочного покрытия на хребтовую балку вагона модели 61-4186**

При проведении эксперимента на четыре зоны хребтовой балки вагона нанесены лакокрасочные покрытия (рисунок 4.10) следующим образом:

- на зону 1 нанесено лакокрасочное покрытие СВАН-500М на металл, очищенный дробеструйной методом, в три слоя (в соответствии с рекомендациями изготовителя лакокрасочной продукции);

- на зону 2 нанесено лакокрасочное покрытие СВАН-500М на металл, очищенный дробеструйным методом, в два слоя (в соответствии с требованиями ГОСТ 54893-2012 [37]);

- на зону 3 нанесено лакокрасочное покрытие СВАН-500М на ранее окрашенную поверхность (влияние нанесения резиновой водоразбавляемой краски СВАН-500М на ранее нанесённое грунт-эмалевое покрытие ЯРЛИсоат 7130 ЖТ);

- на зону 4 нанесено лакокрасочное покрытие ЯРЛИсоат 7130 ЖТ (наиболее распространённое лакокрасочное покрытие, применяемое при окрашивании экипажной части пассажирских вагонов) на ранее окрашенную поверхность, в два слоя (произведена окраска участка хребтовой балки в соответствии с существующей нормативной документацией) [128].



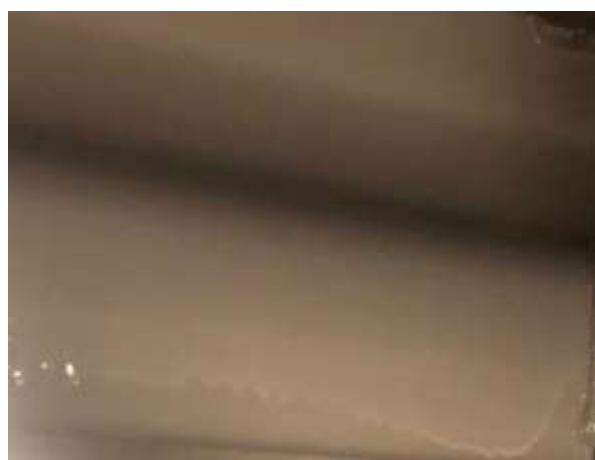
Окрашенная зона 1



Окрашенная зона 2



Окрашенная зона 3



Окрашенная зона 4

**Рисунок 4.11 – Состояние лакокрасочного покрытия на нанесенные зоны**

По результатам проведенного экспериментального нанесения лакокрасочного покрытия установлено:

- проведенной дробеструйной обработкой осуществлено полное удаление ранее нанесённого лакокрасочного покрытия, включая труднодоступные зоны (в том числе в районе сочленения хребтовой балки с промежуточными, шкворневой и концевой балками);

- механический метод очистки не позволяет осуществить полное удаление лакокрасочного покрытия, нанесенного ранее, невозможна полная очистка хребтовой и смежных балок в зонах их сочленения;

- процесс проведения дробеструйной очистки в 15 раз быстрее механической;

– процесс нанесения лакокрасочного покрытия после дробеструйной обработки позволяет снизить воздействие внешних факторов и развитие коррозионного воздействия в межкрасочный период путем создания на поверхности хребтовой балки гладкой, однородной структуры поверхностного слоя металла;

– нанесение лакокрасочного покрытия СВАН-500М позволяет исключить разрушения покрытия при вибрации и деформации.

Технология проведения экспериментального окрашивания вагона модели 61-4186 выполнена с учетом требований типового технологического процесса окрашивания пассажирских вагонов с использованием лакокрасочных материалов повышенной долговечности [128] и изложена в приложении А.

#### **4.6. Выводы по четвертому разделу**

1 На исследованных элементах хребтовых балок имеются многочисленные слои лакокрасочного покрытия, что говорит о невозможности полной очистки металлоконструкции экипажной части существующими способами перед окраской вагона;

2 Коррозионное воздействие на металл хребтовой балки, не подверженной дробеструйной обработке, выше, чем на металле, прошедшем дробеструйную обработку;

3 По результатам дробеструйной обработки образцов и участков хребтовой балки вагона модели 61-4186 сформировалась однородная среда с полным удалением ранее нанесённого лакокрасочного покрытия и коррозионного воздействия;

4 Разработанный метод подготовки хребтовой балки с последующей дробеструйной обработкой и нанесением лакокрасочного покрытия позволяет снизить воздействия внешних факторов на образование и развитие коррозионного воздействия;



5 Изменение твёрдости металла после проведения дробеструйной обработки незначительное при сравнении с механической;

6 Процесс дробеструйной очистки хребтовой балки в 15 раз быстрее, чем механический;

7 Механическое воздействие на хребтовую балку не позволяет произвести полное удаление ранее нанесённого лакокрасочного покрытия, а также приводит к утонению толщины металла при механической обработке;

8 Лакокрасочное покрытие СВАН-500М не имеет аналогов по структуре и защитным свойствам с типами красок, разрешённых ГОСТ 54893-2012 [37];

9 Изученное и исследованное лакокрасочное покрытие в сравнении с другими аналогичными имеет ряд преимуществ;

10 Разработанная технология может использоваться в пассажирских вагонных депо, а также на вагоноремонтных заводах при проведении капитального ремонта без значительных инвестиционных и эксплуатационных затрат.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненных комплексных теоретических и экспериментальных исследований получены новые технические и технологические решения по увеличению долговечности хребтовой балки и повышению жизненного цикла пассажирского вагона.

1 Проведенным анализом структуры парка пассажирских вагонов установлено, что используемые в перевозочной деятельности на территории Российской Федерации модели вагонов, в конструкцию которых заложено наличие хребтовой балки увеличивается и, по состоянию на 31.12.2020 г составляет 86 % от общего парка;

2 В результате исследования вновь изготавливаемой хребтовой балки доказано, что после приварки двутавра шкворневой балки к швеллеру хребтовой балки образуются знакопеременные остаточные напряжения от – 415 МПа до 354 МПа;

3 По результатам экспериментальных исследований определены участки хребтовой балки, подвергающиеся наибольшему коррозионному воздействию (металл в районе сварных швов примыкания к шкворневым, конечным и промежуточным балкам);

4 Исследованием элементов хребтовых балок, выработавших нормативной срок службы (40 лет) установлено, что металл в основном отвечает всем нормативным прочностным характеристикам;

5 Исследования элементов хребтовых балок, выработавших нормативный срок службы показали, что на коррозионное разрушение хребтовой балки в значительной степени влияет формирование в структуре металла значительного разброса остаточных напряжений, возникающих в процессе изготовления и эксплуатации вагона;

6 В результате проведения экспериментального лакокрасочного покрытия на хребтовую балку вагона доказано, что проведение дробеструйной обработки, в том числе в сварочных местах, стабилизирует поля остаточных

напряжений, тем самым увеличивает коррозионную стойкость поверхностного слоя металла;

7 Применение перспективных лакокрасочных покрытий эффективно снижает коррозионное и внешнее воздействия на металлоконструкцию рамы пассажирского вагона;

8 Рекомендуется применение разработанной технологии подготовки и окраски хребтовой балки пассажирского вагона с интеграцией в систему планово-предупредительного ремонта, которая может быть внедрена в минимально короткие сроки во всех дробеструйно-окрасочных комплексах пассажирских вагонных депо и на вагоноремонтных заводах без существенных эксплуатационных и инвестиционных затрат;

9 Перспективой дальнейшей разработки темы является оценка новых лакокрасочных покрытий для защиты экипажной части подвижного состава от воздействия внешних факторов и коррозионного влияния на силовой каркас рамы пассажирского вагона.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

В диссертационной работе применяются следующие обозначения и сокращения:

АО «ФПК» – Акционерное общество «Федеральная пассажирская компания»

АСУ ПВ – автоматическая система управления эксплуатации и ремонтом парка пассажирских вагонов

ВНИИЖТ – Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта

ДР – деповский ремонт пассажирских вагонов

ЗАО НО «ТИВ» – Закрытое акционерное общество Научная организация «Тверской институт вагоностроения»

КВР – капитально-восстановительный ремонт пассажирских вагонов

КР-1 – капитальный ремонт пассажирских вагонов первого объема

КР-2 – капитальный ремонт пассажирских вагонов второго объема

КРМ – капитальный ремонт пассажирских вагонов с модернизацией

ЛКМ – лакокрасочный материал

ЛКП – лакокрасочное покрытие

МКЭ – метод конечных элементов

ОАО «РЖД» – Открытое акционерное общество «Российские железные дороги»

ОАО «ТВЗ» – Открытое акционерное общество «Тверской вагоностроительный завод»

ПКТБ Л – Проектно-конструкторско-технологическое бюро пассажирского комплекса

ПС – поверхностный слой

ПТО – пункт технического обслуживания

РУТ (МИИТ) – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта»

ТБР – текущий безотцепочный ремонт

ТО-1 – техническое обслуживание вагонов в составах и поездах на пунктах технического обслуживания станций формирования и оборота пассажирских поездов, а также в поездах в пути следования и на пунктах технического обслуживания промежуточных станциях

ТО-2 – сезонное техническое обслуживание вагонов перед началом летних и зимних перевозок

ТО-3 - техническое обслуживание – единая техническая ревизия основных узлов пассажирских вагонов, которая проводится в пунктах формирования пассажирских поездов.

ТОР – текущий отцепочный ремонт

ТР – текущий ремонт

ЦМВ – цельнометаллический вагон

ЦНИИТМАШ – Акционерное общество «Научно-производственное объединение "Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения"»

RAL – Международный стандарт цветовой палитры, имеющий вид кодового обозначения, состоящего из префикса RAL и цифрового кода, присвоенного каждому цвету.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1 **Антипин, Д.Я.** Деформированное состояние подкреплённой двухслойной обшивки подоконного пояса кузова пассажирского вагона / Д.Я. Антипин, А.М. Высоцкий // Тезисы докладов 56-й научной конференции профессорско-преподавательского состава / под редакцией О.А. Горленко и И.В. Говорова. – Брянск : БГТУ, 2002. – С. 150–152.
- 2 **Бате, К.** Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Р. Вилсон; перевод с английского А.С. Алексеева и др. ; под редакцией А.Ф. Смирнова. – Москва : Стройиздат, 1982. – 447 с.
- 3 Белорусская железная дорога / В.И. Сенько, И.Ф. Пастухов, В.В. Свириденко [и др.]. – Минск, 1999. – 25 с.
- 4 **Биргер, И.А.** Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – Москва : Машгиз, 1963. – 232 с.
- 5 **Битюцкий, А.А.** Анализ напряжённого состояния и совершенствование конструкций соединений несущих элементов кузова полувагона : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.А. Битюцкий. – Ленинград : ЛИИЖТ, 1984. – 19 с.
- 6 **Блохин, Н.И.** Динамика поезда (нестационарные продольные колебания) / Н.И. Блохин, Л.А. Манашкин. – Москва : Транспорт, 1980. – 290 с.
- 7 **Бобров, М.В.** Методика уточнённого расчёта напряжённо-деформированного состояния трёхслойной несущей системы рамы грузового рефрижераторного вагона : дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / М.В. Бобров. – Брянск, 1990. – 137 с.
- 8 **Болотин, В.В.** Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. – Москва : Машиностроение, 1984. – 312 с.
- 9 **Бороненко, Ю.П.** Расчёт узлов вагонов на прочность МКЭ : учебное пособие и руководство к использованию учебным пакетом программ / Ю.П. Бороненко, А.В. Третьяков, Г.Е. Сорокин. – Ленинград : ЛИИЖТ, 1991. – 39 с.

10 **Броек, Д.** Основы механики разрушения / Д. Броек. – Москва : Высшая школа, 1980. – 368 с.

11 **Быков, А.И.** Применение метода конечных элементов к расчёту кузовов вагонов / А.И. Быков // Вопросы строительной механики кузовов вагонов. – Тула, 1977. – С. 28–33.

12 Вагон с комбинированным отоплением. Расчёт кузова на прочность. 425.01.00.000РР. Калинин, 1974 (Калининский вагоностроительный завод).

13 Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества, РД 24.050.37-95, ГосНИИВ, 1995 г.

14 Вагоны пассажирские. Руководство по капитально-восстановительному ремонту (КВР) 046 ПКБ ЦЛ 2007РК. URL: [http://static.scbist.com/scb/uploaded/6236\\_1395743613.pdf](http://static.scbist.com/scb/uploaded/6236_1395743613.pdf) (дата обращения 14.01.2021).

15 Вагоны пассажирские цельнометаллические. Руководство по капитальному ремонту (КР-2), ЛВ1.0030 РК. URL: <https://docs.cntd.ru/document/572721478> (дата обращения 14.01.2021).

16 Вагоны пассажирские. Руководство по капитальному ремонту (КР-1), ЛВ1.0031 РК. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=366294#iwe6N4TQXgfxK3tZ1> (дата обращения 14.01.2021).

17 **Вертинский, С.В.** Динамика вагонов / С.В. Вертинский, В.Н. Данилов, В.Д. Хусидов. – Москва : Транспорт, 1991. – 360 с.

18 **Винокуров, В.А.** Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев. – Москва : Машиностроение, 1996. – 576 с.

19 **Винокуров, М.В.** Вагоны / М.В. Винокуров, Л.А. Шадур, П.Г. Проскурнев [и др.] ; под редакцией М.В. Винокурова. – Москва : Трансжелдориздат, 1953. – 704 с.

20 Влияние возрастной структуры и эксплуатационных показателей парка грузовых вагонов на безопасность движения // Вагоны и вагонное хозяйство / ЦНИИТЭИ МПС. – 2000. – № 4. – С. 1–28.

21 **Галлагер, Р.** Метод конечных элементов : Основы / Р. Галлагер ; перевод с английского В.М. Картвелиш ; под редакцией Баничука В.Г. – Москва : Мир, 1984. – 428 с.

22 **Гарг, В.К.** Динамика подвижного состава / В.К. Гарг, Р.В. Дуккипати ; перевод с английского под редакцией Н.А. Панькина. – Москва : Транспорт, 1988. – 391 с.

23 Гигиенический норматив ГН 2.1.6.3492-17 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений» / Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. – Москва, 2019.  
URL: <https://docs.cntd.ru/document/556185926> (дата обращения 29.02.2021).

24 **ГОСТ 11964** Дробь чугунная и стальная техническая. Общие технические условия. Москва : ИПК Издательство стандартов, 2000. – 9 с.  
URL: <http://rostest.info/gost/001.025.100.070/gost-11964-81/> (дата обращения 29.04.2021).

25 **ГОСТ 14019-2003** (ИСО 7838:1985). Материалы металлические. Метод испытания на изгиб. Москва : Стандартиформ, 2006. – 7 с.  
URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200035324> (дата обращения 29.03.2021).

26 **ГОСТ 15.902-2014.** Система разработки и постановки продукции на производство. Железнодорожный подвижной состав. Порядок разработки и постановки на производство. Москва : Стандартиформ 2019. – 36 с.  
URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200114167> (дата обращения 29.04.2022).

27 **ГОСТ 17433-80** «Промышленная чистота. Сжатый воздух. Классы загрязненности». Москва : Стандартиформ 2019. – 2 с.  
URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006327> (дата обращения 18.09.2021).



28 **ГОСТ 2497-84 (ИСО 6892-84)**. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Москва : Стандартиформ, 2008. – 22 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004888> (дата обращения 18.01.2021).

29 **ГОСТ 25.101-83**. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. Расчёты и испытания на прочность. Москва : Стандартиформ, 2019. – 25 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012857> (дата обращения 20.03.2020).

30 **ГОСТ 25.502-79**. Расчёты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. Москва : Страндартиформ, 2005. – 50 с. URL <https://docs.cntd.ru/document/1200004992> (дата обращения 29.07.2021).

31 **ГОСТ 31814-2012**. Оценка соответствия. Общие правила отбора образцов для испытаний продукции при подтверждении соответствия. Москва : Стандартиформ 2013. – 10 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200101108> (дата обращения 30.11.2021).

32 **ГОСТ 31993-2013**. Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия. – Москва : Стандартиформ, 2013. – 16 с. URL: [https://allgosts.ru/87/040/gost\\_31993-2013](https://allgosts.ru/87/040/gost_31993-2013) (дата обращения 22.02.2022).

33 **ГОСТ 32202-2013**. Сжатый воздух пневматических систем железнодорожного подвижного состава. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 10 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200108260> (дата обращения 2.01.2022).

34 **ГОСТ 33788-2016**. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. Москва : Стандартиформ 2016. – 42 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/63283/> (дата обращения 11.12.2021).

35 **ГОСТ 33976-2016**. Соединения сварные в стальных конструкциях железнодорожного подвижного состава. Требования к проектированию,

выполнению и контролю качества. Москва : Стандартиформ 2017. – 49 с.  
URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200141745> (дата обращения 15.07.2021).

36 **ГОСТ 5267-63.** Сталь прокатная специальных профилей для вагоностроения – Москва : Издательство стандартов, 1969. – 154 с.  
URL: <http://gost.gtsever.ru/Index2/1/4294749/4294749736.htm> (дата обращения 11.12.2021).

37 **ГОСТ 54893-2012.** Национальный стандарт Российской Федерации. Вагоны пассажирские локомотивной тяги и моторвагонный подвижной состав. Требования к лакокрасочным покрытиям и противокоррозионной защите. Москва : Стандартиформ, 2012. – 88 с.  
URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200092604> (дата обращения 23.11.2021).

38 **ГОСТ 8240-97.** Швеллеры стальные горячекатаные – Москва : Стандартиформ, 1997. – 11 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200019824> (дата обращения 23.11.2021).

39 **ГОСТ 8420-74** Материалы лакокрасочные. Методы определения условной вязкости. Москва : ИПК Издательство стандартов, 2004. – 6 с.  
URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200019414> (дата обращения 1.11.2021).

40 **ГОСТ 9.010-80.** Единая система защиты от коррозии и старения. Воздух сжатый для распыления лакокрасочных материалов. Технические требования и методы контроля. – Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1980. – 17 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200014780> (дата обращения 3.03.2022).

41 **ГОСТ 9.401-2018.** Межгосударственный стандарт. Единая система защиты от коррозии и старения покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов. – Москва : Стандартиформ, 2019. – 122 с.  
URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200160589> (дата обращения 6.01.2022).

42 **ГОСТ 9.402-2004.** Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к

окрашиванию. – Москва : Стандартиформ, 2004. – 44 с.  
<https://docs.cntd.ru/document/1200040460> (дата обращения 15.02.2022).

43 **ГОСТ 9454-78.** Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах – Москва : Изд-во стандартов, 1979. – 10 с. URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4294848/4294848714.htm> (дата обращения 21.10.2021).

44 **ГОСТ 9.912-89 (СТ СЭВ 6446-88).** Единая система защиты от коррозии и старения. Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии. Москва : Издательство стандартов, 1990. – 18 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/11272/> (дата обращения 19.02.2021).

45 **ГОСТ Р 54612-2011.** Национальный стандарт Российской Федерации. Вагоны пассажирские локомотивной тяги и моторвагонный подвижной состав. Требования к обмывке и очистке. – Москва : Стандартиформ, 2012. – 19 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200089035> (дата обращения 12.11.2020).

46 **ГОСТ Р 54893-2012.** Вагоны пассажирские локомотивной тяги и моторвагонный подвижной состав. Требования к лакокрасочным покрытиям и противокоррозионной защите. Москва : Стандартиформ 2012. – 85 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200092604> (дата обращения 10.01.2022).

47 **ГОСТ Р 54931-2008.** Приборы контроля и регулирования технологических процессов. Общие технические условия. Москва : Стандартиформ 2009 – 27 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/47761/> (дата обращения 21.10.2021).

48 **ГОСТ Р 55182-2012.** Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Общие технические требования. Москва : Стандартиформ 2019 – 24 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/53533/> (дата обращения 15.09.2021).

49 **ГОСТ Р 55724-2013.** Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. Москва : Стандартиформ 2019 – 28 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/56025/> (дата обращения 11.08.2021).

50 **ГОСТ Р ИСО 17637-2014.** Контроль неразрушающий. Визуальный контроль соединений, выполненных сваркой плавлением. Москва : Стандартиформ 2015 – 16 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/58009/> (дата обращения 15.02.2022).

51 **ГОСТ Р ИСО 5817-2009.** Сварка. Сварные соединения из стали, никеля, титана и их сплавов, полученные сваркой плавлением (исключая лучевые способы сварки). Уровни качества. Москва : Стандартиформ 2011 – 24 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/50437/> (дата обращения 23.11.2021).

52 **ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012.** Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов геометрии и сплошности в металлических материалах. Часть 1. Сварка плавлением. Москва : Стандартиформ 2014 – 30 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/54500/> (дата обращения 21.01.2022).

53 **Евсеев, Д.Г.** Повышение долговечности хребтовой балки пассажирского вагона / Д.Г. Евсеев, М.Ю. Куликов, А.С. Шинкарук // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 71–76.

54 **Евсеев, Д.Г.** Способ увеличения продолжительности жизненного цикла пассажирского плацкартного вагона / Д.Г. Евсеев, М.Ю. Куликов, А.С. Шинкарук, М.А. Ларионов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 6 (103). – С. 47–52.

55 **Екобори Т.** Физика и механика разрушения и прочности твёрдых тел / Т. Екобори. – Москва : Металлургия, 1971. – 264 с.

56 **Еременко, С.Ю.** Метод конечных элементов в механике деформируемых тел / С.Ю. Еременко. – Харьков : Основа, 1991. – 271 с.

57 **Ермаков, В.М.** Разработка системы подбора лакокрасочного покрытия пассажирских вагонов с целью повышения их эксплуатационной надёжности / В.М. Ермаков. – Москва , 2007. – 127 с.

58 **Жук, Н.П.** Курс теории коррозии и защиты металлов / Н.П. Жук. – Москва : Metallurgia, 1974. – 472 с.

59 **Зенкевич, О.** Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич ; перевод с английского под редакцией Б.Е. Победра. – Москва : Мир, 1975. – 541 с.

60 Инструкция по сварке и наплавке узлов и деталей при ремонте пассажирских вагонов ЦЛ-201-2019 (приложение № 53 к протоколу Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, протокол от 15–16 октября 2019 г. № 71). – Москва : АО «ВНИИЖТ», 2019. – 185 с.

61 Исследования по созданию пассажирских вагонов для скоростей движения до 200 км/ч : отчёт / ЛИИЖТ ; руководитель работы И.И. Челноков. Инв. № Б 69029910. – Ленинград , 1969. – 214 с.

62 **Калыгин, В.Г.** Промышленная экология : учебник / В.Г. Калыгин. – Москва : ИКЦ «Академкнига», 2005. – 431 с.

63 **Качанов, Л.М.** Основы механики разрушения / Д.М. Качанов. – Москва : Наука, 1974. – 312 с.

64 **Кеше, Г.** Коррозия металлов / Г. Кеше. – Москва : Metallurgia, 1984. – 400 с.

65 **Кобищанов, В.В.** Выбор параметров конструкций кузовов вагонов с тонкой несущей обшивкой : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.В. Кобищанов. – Москва : МИИТ, 1999. – 57 с.

66 **Кобищанов, В.В.** Расчёт кузовов вагонов на прочность : учебное пособие / В.В. Кобищанов. – Брянск : БИТМ, 1987. – 80 с.

67 **Кобищанов, В.В.** Методика прогнозирования усталостной долговечности несущих конструкций кузовов вагонов / В.В. Кобищанов, Д.Я. Антипин // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения: труды V Международной конференции (г. Санкт-Петербург, 14–17 окт. 2003 г.). – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГПУ, 2003. – С. 248–257.

68 **Кобищанов, В.В.** Расчёт кузовов вагонов по частям на основе метода конечных элементов / В.В. Кобищанов, Е.А. Холохонова // Транспортное машиностроение. – 1991. – Вып. 2. – С. 3–6.

69 **Когаев, В.П.** Расчёты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: справочник / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – Москва : Машиностроение, 1985. – 224 с.

70 **Когаев, В.П.** Прочность и износостойкость деталей машин: учеб. пособие для машиностр. спец. вузов / В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов. – Москва : Высшая школа, 1991. – 319 с.

71 **Конюхов, А.Д.** Коррозия и надёжность железнодорожной техники / А.Д. Конюхов. – Москва : Транспорт, 1995. – 174 с.

72 **Конюхов, А.Д.** Предупреждение коррозионных повреждений вагонов / А.Д. Конюхов // Железнодорожный транспорт. – 1976. – № 11. – С. 51–54.

73 **Коршунов, С.Д.** Разработка методики оценки ресурса несущих конструкций вагонов, прошедших капитально-восстановительный ремонт / С.Д. Коршунов, Д.Я. Антипин, Ю.М. Черкашин // Вестник ВНИИЖТ. – 2011. – № 1. – С. 5–8.

74 **Коршунов, С.Д.** Совершенствование метода оценки несущей способности и остаточного ресурса кузовов пассажирских вагонов после ремонта : дис. ... канд. техн. наук / С.Д. Коршунов. – Брянск, 2014. – 171 с.

75 **Коршунов, С.Д.** Современные методы испытаний железнодорожного подвижного состава, прошедшие ремонт различных объёмов и вновь построенного / С.Д. Коршунов, С.Л. Самошкин // Вагонный парк. – 2012. – № 7. – С. 21–25.

76 **Костенко, Н.А.** Прогнозирование надёжности транспортных машин / Н.А. Костенко. – Москва : Машиностроение, 1989. – 240 с.

77 **Котуранов, В.Н.** Развитие и обобщение методов исследования напряжённого состояния несущих элементов вагонов : отчёт / МИИТ ;

руководитель работы В.Н. Котуранов. – Инв. № Б 601091. – Москва, 1977. – 59 с.

78 **Кочнов, А.Д.** Методы расчёта показателей надёжности элементов конструкции вагонов при постепенных отказах / А.Д. Кочнов, Ю.М. Черкашин, А.М. Краснобаев // Современные методы расчёта вагонов на прочность, надёжность и устойчивость : сборник трудов ВНИИЖТ. – Москва : Транспорт, 1986. – 179 с.

79 **Красновский, А.Е.** Влияние возрастной структуры и эксплуатационных показателей парка грузовых вагонов на безопасность движения / А.Е. Красновский // Железнодорожный транспорт. Серия : Вагоны и вагонное хозяйство ОИ / ЦНИИТЭИ МПС. – 2000. – № 4. – С. 1–28.

80 **Лапшин, В.Ф.** Прогнозирование прочности и долговечности вагонов для перевозки коррозионно-активных грузов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук 05.22.07 / В.Ф. Лапшин. – Екатеринбург : УрГУПС. 2000. – 48 с.

81 **Лисевич, Т.В.** Передовые технологии деповского ремонта пассажирских вагонов : учебное пособие для вузов / Т.В. Лисевич, Е.В. Александров. – Самара : СамГАПС, 2005. – 80 с.

82 **Лозбинев, В.П.** Исследование напряженного состояния и разработка методики оптимального проектирования ортогонально подкрепленных тонкостенных пространственных систем кузовов грузовых вагонов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.П. Лозбинев. – Москва : МИИТ, 1982. – 50 с.

83 **Миронов, М.Г.** Экономика отрасли (машиностроение) / М.Г. Миронов, С.В. Загородников. – Москва : Инфра-М, 2005. – 320 с.

84 **Михальченко, Г.С.** Совершенствование динамических качеств подвижного состава железных дорог средствами компьютерного моделирования / Г.С. Михальченко, Д.Ю. Погорелов, В.А. Симонов // Тяжелое машиностроение. – 2003. – № 12. – С. 2–6.

85 **Морозов, Н.Ф.** Математические вопросы теории трещин / Н.Ф. Морозов. – Москва : Наука, 1984. – 255 с.

86 **Мямлин, С.В.** Улучшение динамических качеств рельсовых экипажей путем усовершенствования характеристик рессорного подвешивания : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / С.В. Мямлин. – Луганск, 2004. – 37 с.

87 **Николаев, К.И.** К вопросу оценки надёжности пассажирских тележек / К.И. Николаев, К.Н. Войнов. – Ленинград : ЛИИЖТ, 1969. – Вып. 298. – С. 120–125.

88 **Никольский, Е.Н.** Расчет несущих конструкций по методу конечных элементов / Е.Н. Никольский. – Брянск : БИТМ, 1982. – 99 с.

89 Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ВНИИВ-ВНИИЖТ, 1983. – 260 с.

90 **Норри, Дю** Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. Фриз ; перевод с английского под редакцией Г.И. Марчука. – Москва : Мир, 1981. – 304 с.

91 Об утверждении методических указаний по проведению замеров остаточной толщины металлических деталей и узлов технических средств, находящихся на балансе ОАО «РЖД» : утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 11 ноября 2013 г № 2405р. URL: <https://jd-doc.ru/2013/noyabr-2013/4913-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-11-11-2013-n-2405r>.

92 **Образцов, И.Ф.** Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов / И.Ф. Образцов, Л.М. Савельев, Х.С. Хазанов. – Москва : Высшая школа, 1985. – 392 с.

93 **Овсеенко, А.Н.** Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения : учебное пособие / А.Н. Овсеенко, В.И. Серебряков, М.М. Гаек. – Москва : Янус-К, 2004. – 290 с.

94 **Окишев, В.К.** Применение метода конечных элементов к расчетам на прочность вагонных конструкций / В.К. Окишев, В.Э. Петер, С.П. Андросюк,



А.В. Терехов // Труды Омского ин-та инженеров железнодорожного транспорта. – 1979. – Вып. 215. – С. 75–79.

95 Отчёт о научно-исследовательской работе: «Расчет напряжённно-деформированного состояния вагона 61-4447.06 с минимально допустимыми параметрами основных элементов силового каркаса», ЗАО НО «ТИВ» / Д.И. Гончаров, А.С. Шинкарук, Тверь. 2021. – 35 с.

96 Отчёт о работе: «Исследование несущей способности кузова вагона модели 61-4447 из углеродистых и низколегированных сталей. Выбор параметров подкреплений гладкой обшивки верхнего и среднего поясов боковых стен», ЗАО НО «ТИВ» / А.А. Юхневский, П.С. Ломаков. – Тверь, 2009. – 65 с.

97 **Очерхуу, Д.** Оценка остаточного ресурса и продления срока службы пассажирских вагонов УБЖД / Д. Очерхуу // Современные технологии. Современный анализ. Моделирование. – 2014. – № 3(43). – С. 15–16.

98 **Панасюк, В.В.** Механика разрушения и прочность материалов : справочное пособие в четырех томах / В.В. Панасюк. – Т. 1–3. – Киев : Наукова думка, 1988.

99 **Панасюк, В.В.** Предельное равновесие хрупких тел с трещинами / В.В. Панасюк. – Киев : Наукова думка, 1968. – 246 с.

100 **Партон, В.З.** Механика разрушения : От теории к практике / В.З. Партон. – Москва : Наука, 1990. – 240 с.

101 **Партон, В.З.** Механика упругопластического разрушения / В.З. Партон, Е.М. Морозов. – Москва : Наука, 1985. – 504 с.

102 **Подзей, А.В.** Технологические остаточные напряжения / А.В. Подзей, А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев, Г.З. Серебренников. – Москва : Машиностроение, 1973. – 216 с.

103 Положение о продлении срока службы пассажирских вагонов, курсирующих в международном сообщении : утв. Протоколом шестьдесят

первого заседания Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества от 21–22.10.2014 г.

104 Правила неразрушающего контроля сварных соединений при ремонте вагонов. Специальные требования. ПР НК В.5-2013.

105 Приказ Министерства путей сообщения Российской Федерации от 4 апреля 1997 г. № 9Ц «О введении новой системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов». URL: <https://base.garant.ru/70489520/> (дата обращения 15.04.2021).

106 Приказ Минтранса России от 13 января 2011 года № 15 «О внесении изменений в приказ Министерства путей сообщения Российской Федерации от 4 апреля 1997 года № 9Ц». URL: [https://www.glavbukh.ru/npd/edoc/99\\_902262500](https://www.glavbukh.ru/npd/edoc/99_902262500) (дата обращения 15.05.2021).

107 Приказ Минтранса России от 21 декабря 2010 года № 286 «Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации». URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/6/1349> (дата обращения 22.08.2020).

108 Разрушение : в 7 т. / редактор Г. Либовиц ; перевод с английского А.С. Вавакина. – Москва : Мир, 1973–1977.

109 РД 24.050.37-95 «Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества». – Москва : ВНИИВ, 1995. – 96 с.

110 **Розенфельд, И.Л.** Коррозия и защита металлов / И.Л. Розенфельд. – Москва : Металлургия, 1970. – 448 с.

111 **Савоськин, А.Н.** Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог / А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак, А.П. Матвеевичев [и др.] ; под общей редакцией А.Н. Савосыкина. – Москва : Машиностроение, 1990. – 288 с.

112 **Седов, Л.И.** Механика сплошной среды : в 2 т. / Л.И. Седов. – Москва : Наука, 1983–1984.

113 **Селинов, В.И.** Проектирование подвешивания вагонов : учебное пособие / В.И. Селинов. – Брянск : БГТУ, 1999. – 251 с.

114 **Серенсена, С.В.** Несущая способность и расчет деталей машин на прочность : руководство и справочное пособие. – 3-е изд. перераб. и доп. ; под редакцией С.В. Серенсена. – Москва : Машиностроение, 1975. – 488 с. с ил.

115 **Скалли, Дж.** Основы учения о коррозии и защите металлов / Дж. Скалли. – Москва: Мир, 1978. – 223 с.

116 **Слепян, Л.И.** Механика трещин / Л.И. Слепян. – Ленинград : Судостроение, 1981. – 295 с.

117 **Соколов, М.М.** Диагностирование вагонов / М.М. Соколов. – Москва : Транспорт, 1990. – 197 с.

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

119 **Соколов, М.М.** Исследование прочности узлов и элементов вагонных конструкций : методические указания к УИР / М.М. Соколов, Ю.П. Бороненко, А.А. Эстлинг. – Ленинград : ЛИИЖТ, 1984. – 35 с.

120 **Соколов, С.И.** Исследования динамики и прочности пассажирских вагонов / С.И. Соколов, В.В. Наварро, Г.Ф. Левенсон. – Москва : Машиностроение, 1976. – 223 с.

121 Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений : в 2 т. / под редакцией Ю. Мураками. – Москва : Мир, 1990. – 417 с.

122 **Стадницкий, Г.В.** Экология : учебник для химико-технологических и технических специальностей вузов / Г.В. Стадницкий. – Санкт-Петербург : Химиздат, 2001. – 287 с.

123 Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации: утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/2/859> (дата обращения 3.09.2020).

124 **Сулима, А.М.** Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – Москва : Машиностроение, 1988. – 240 с.

125 **Тарабасов, Н.Д.** Расчёты на прочность / Н.Д. Тарабасов. – Москва : Машиностроение, 1984. – 294 с.

126 **Татарчук, В.В.** К оценке прочности отдельных деталей и узлов подвижного состава / В.В. Татарчук, Е.Ф. Радзиховская. – Днепропетровск : Днепр. ин-т инженеров железнодорожного транспорта, 1984. – 106 с.

127 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава» (ТР ТС 001/2011). URL: <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/texnreg/deptexreg/tr/Documents/TR%20Podvignoisostev%20PID.pdf> (дата обращения 13.11.2020).

128 Типовой технологический процесс окрашивания пассажирских вагонов с использованием лакокрасочных материалов повышенной долговечности. Утверждён распоряжением ОАО «РЖД» от 31 августа 2020 г. № 1857р. – 221 с.

129 **Третьяков, А.В.** Продление срока службы грузовых вагонов на основе метода управления индивидуальным ресурсом / А.В. Третьяков // Железные дороги мира. – 2004. – № 4. – С. 18–23.

130 **Третьяков, А.В.** Продление срока службы подвижного состава / А.В. Третьяков. – Москва : Изд-во МБА, 2011. – 304 с.

131 **Третьяков, А.В.** Системный подход при диагностировании вагонов / А.В. Третьяков. – Москва : ЦНИИ ТЭИ ТМ, 1987. – С. 12–15.

132 **Третьяков, А.В.** Управление ресурсом грузовых вагонов в эксплуатации / А.В. Третьяков // Железнодорожный транспорт. – 2004. – № 3. – С. 41–44.

133 **Третьяков, А.В.** Продление срока службы вагонов метрополитена / А.В. Третьяков, С.В. Борисов // Железные дороги мира. – 2004. – № 4. – С. 23–27.

- 134 **Уланов, А.М.** Основы метода конечных элементов / А.М. Уланов // Самара, 2011. – 19 с.
- 135 **Устич, П.А.** Надёжность вагонов / П.А. Устич. – Москва : Транспорт, 1982. – 110 с.
- 136 **Устич, П.А.** Надёжность рельсового нетягового подвижного состава / П.А. Устич, В.А. Карпычев, М.Н. Овечников. – Москва : Издат. дом «Вариант», 1999. – 416 с.
- 137 **Ушкалов, В.Ф.** Статистическая динамика рельсовых экипажей / В.Ф. Ушкалов, Л.М. Резников, С.Ф. Редько. – Киев : Наукова думка, 1982. – 360 с.
- 138 **Филин, А.П.** Элементы теории оболочек / А.П. Филин. – Ленинград : Судостроение, 1970. – 205 с. с ил.
- 139 **Хеллан, К.** Введение в механику разрушения / К. Хеллан. – Москва : Мир, 1988. – 364 с.
- 140 **Херцберг, Р.В.** Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Р.В. Херцберг. – Москва : Металлургия, 1989. – 576 с.
- 141 **Хохлов, А.А.** Решение экстремальных задач динамики вагонов / А.А. Хохлов. – Москва : МИИТ, 1994. – 105 с.
- 142 **Цвик, Л.Б.** Применение метода конечных элементов в статике деформирования : учебное пособие для вузов по специальности «Прикладная математика» / А. Б. Цвик. – Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 1995. – 126 с. ил.
- 143 **Черепанов, Г.П.** Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – Москва : Наука, 1974. – 640 с.
- 144 **Шадур, Л.А.** Вагоны / Л.А. Шадур – Москва : Транспорт, 1980. – 439 с.
- 145 **Шадур, Л.А.** Вагоны : Конструкция, теория и расчет / Л.А. Шадур, И.И. Челноков, Л.Н. Никольский, Е.Н. Никольский [и др.] ; под редакцией Л.А. Шадура. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1980. – 440 с.

146 **Шинкарук, А.С.** Долговечность хребтовой балки плацкартного вагона / А.С. Шинкарук // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2020. – № 4. – С. 40–41.

147 **Шинкарук, А.С.** Коррозионное влияние на несущие элементы пассажирского вагона / А.С. Шинкарук // Транспортное машиностроение – 2022. № 4(4) – С 69 – 77.

148 **Шлугер, М.А.** Коррозия и защита металлов / М.А. Шлугер. – Москва : Металлургия, 1981. – 216 с.

149 **Evseev, D.G.** Technological Safety of a Passenger Car. Ensuring Reliable Maintenance of the Main Components and Elements of a Passenger Car During Its Operation Cycle / D.G. Evseev, M.Yu. Kulikov, A.S. Shinkaruk // 2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). – 2021. – P. 72–74. DOI: 10.1109/ITQMIS53292.2021.9642812.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### **Технология подготовки и нанесения лакокрасочного покрытия на хребтовую балку пассажирского вагона**

В целях обеспечения повышения продолжительности жизненного цикла пассажирского вагона, а также обеспечения долговечности содержания хребтовой балки разработана технология окраски экипажной части пассажирского вагона.

Окрашивание лакокрасочными материалами (ЛКМ) должно производиться только в окрасочных камерах с вертикальной или диагональной вентиляцией, обеспечивающих температуру воздуха не менее 18–20 °С и минимальный 120-кратный обмен воздуха. Проведение окрасочных работ в помещениях с другими условиями или в условиях открытой атмосферы запрещено [128].

В технически обоснованных случаях допускается производить выдержку окрашенного вагона и локальный ремонт лакокрасочного покрытия на позициях вне малярного участка при соблюдении требований ГОСТ 32202-2013 [33] в части соблюдения температурного режима и влажности.

Вагон, подлежащий окрашиванию, должен быть отмыт от жировых, грязевых и других видов загрязнений в соответствии с ГОСТ Р 54612 [45] и подан на окрасочные позиции после проведения наружной обмывки и сушки.

До подачи на позицию окраски должен быть произведён слив системы водоснабжения и выполнена очистка вагона от снега и льда в зимний период.

Операции по демонтажу навесных деталей, ремонту кузова вагона и экипажной части вагона должны быть выполнены до подачи вагона на позицию окраски.

После проведения вышеуказанных операций вагон подается на позицию дробеструйной обработки для очистки хребтовой балки.

## Продолжение приложения А

Дробеструйная обработка производится последовательно по всей длине балки. Очистка осуществляется в специальных помещениях с помощью соответствующего дробеструйного материала с работающей вентиляцией, обеспечивающей минимальный 60-кратный обмен воздуха. Степень очистки воздуха от взвешенных веществ должна соответствовать предельно-допустимой концентрации 0,15 мг/м<sup>3</sup> согласно требованиям ГН 2.1.6.3492-17 Российской Федерации [23].

Поверхность хребтовой балки обрабатывают металлической дробью или другими абразивными материалами. Для обработки применяют стальную или чугунную дробь с острыми гранями размером 0,8–2,5 мм в зависимости от диаметра насадки. Возможно использование металлического песка или металлического гранита.

Все работы по очистке хребтовой балки, включая подготовку поверхности к дробеструйной обработке, должны проводиться в специализированных помещениях при работающей приточно-вытяжной вентиляции и температуре окружающей среды не ниже 15 °С или иной, оговоренной нормативной документацией, техническими условиями или технической спецификацией.

По результатам обработки хребтовая балка должна соответствовать шероховатости Rz-50. Проверка проводится с использованием образцов шероховатости или специальным прибором. В случае если поверхность на элементах хребтовой балки не обработана до получения необходимых параметров шероховатости, проводится дополнительная дробеструйная обработка до получения требуемого результата.

При проведении дробеструйной обработки в обязательном порядке удаляется ранее нанесенное лакокрасочное покрытие в полном объеме.



## Продолжение приложения А

После проведения дробеструйной обработки балки проводится очистка воздуха от внешних веществ и вагон подается на позицию подготовки к окраске.

Все работы по окрашиванию, включая подготовку поверхности, а также выдержка окрашенного вагона, должны проводиться в специализированных помещениях (малярный цех или участок) при работающей приточно-вытяжной вентиляции и температуре окружающей среды не ниже 15 °С, влажности воздуха не выше 80 %, если иное не оговорено нормативной документацией, техническими условиями и технической спецификацией на материал.

Температура кузова вагона должна быть не менее чем на 3 °С выше точки росы.

Все применяемые лакокрасочные материалы должны соответствовать стандартам, техническим условиям или технической спецификации на материал и быть обеспечены следующей нормативной документацией:

- технические условия – для российских производителей;
- заключения ведомственных организаций;
- свидетельства о государственной регистрации, внесенные в Реестр свидетельств о государственной регистрации.

Все работы по подготовке поверхности и окрашиванию должны производиться квалифицированным и обученным персоналом, прошедшим целевой инструктаж и имеющим необходимые допуски к работе.

Последовательность операций определяется маршрутными картами технологического процесса.

Контроль за проведением работ и соблюдением технологического процесса должен осуществляться мастером или технологом, а также приемщиком вагонов (при наличии предусмотренной должности в штатном расписании структурного подразделения). Проверка качества работ должна

## Продолжение приложения А

осуществляться по операциям, изложенным в технологическом процессе, начиная с подготовки поверхности и до их окончания.

Приемочный контроль должен осуществляться комиссионно после проведения дробеструйной обработки кузова и после каждого нанесения лакокрасочного слоя.

Все лакокрасочные материалы перед применением должны быть приготовлены в краскозаготовительном отделении в соответствии с требованиями настоящего технологического процесса специально обученным персоналом. Приготовление материалов на рабочих местах запрещается.

При отсутствии специализированного краскоприготовительного помещения допускается приготовление лакокрасочных материалов в специально выделенном месте окрасочного комплекса.

Цвет лакокрасочных материалов, применяемый для окраски подвагонного оборудования, должен соответствовать международной цветовой картотеке RAL 7000.

Другие цвета – по согласованию с Заказчиком.

Сжатый воздух, используемый в процессах дробеструйной очистки и пневматического распыления лакокрасочных материалов, должен быть осушен и очищен от пыли и масла в соответствии с требованием ГОСТ 9.010-80 «Воздух сжатый для распыления лакокрасочных материалов» [40] и ГОСТ 17433-80 «Промышленная чистота. Сжатый воздух. Классы загрязненности» [27].

Количество работающего персонала и его распределение по операциям окрашивания определяется путем создания технически обоснованных норм на производство данных операций, которые разрабатываются работниками отдела труда структурных подразделений с привлечением для снятия хронометража инженерно-технических работников.

## Продолжение приложения А

Покрытие на поверхности балки должно быть однородным, гладким и сплошным, без потеков, разнооттеночности, трещин, проколов и сморщивания.

Технологический процесс окрашивания предусматривает последовательность выполнения операций. Все нижеперечисленные операции выполняются в малярном цехе на участках подготовки, в дробеструйной камере и окрасочно-сушильных камерах. Принцип организации производства в малярном цехе – последовательно-поточный. В процессе работ последовательность операций допускается менять в зависимости от условий заданного технологического цикла. Возможно совмещение операций в одно и то же время.

Перечень выполняемых операций при окрашивании хребтовой балки пассажирского вагона при проведении вагону планового вида ремонта (КР-1, КР-2, КВР, КРМ) приведен в таблице А.1.

**Таблица А.1 – Перечень выполняемых операций при окрашивании хребтовой балки вагона**

№ п/п	Наименование операции
1	2
1	Дробеструйная обработка хребтовой балки
2	Полная очистка от старого покрытия, ржавчины и т.п.
3	Обдувка воздухом
4	Обезжиривание поверхностей
5	Окрашивание первым слоем краски
6	Сушка
7	Окрашивание вторым слоем краски
8	Сушка
9	Окрашивание третьим слоем
10	Сушка

Операции 1–6, отраженные в таблице 1, производятся структурными подразделениями, осуществляющими ремонт вагонов на специализированных площадях вне окрасочного комплекса в процессе разборки, дефектации металла и ремонта. Эти операции могут быть перераспределены в регламентах взаимодействия.

## Продолжение приложения А

В рамках проведения технического обслуживания в объемах ТО-1, ТО-2 или ТО-3, текущего отцепочного или деповского ремонта необходимо проводить осмотр лакокрасочного покрытия с последующим его локальным ремонтом в местах механических повреждений.

Проведение локального ремонта является неотъемлемой частью сохранения лакокрасочного покрытия и внешнего вида и предупреждения возникновения и развития коррозии металла кузова на протяжении всего срока службы.

Все материалы для окрашивания должны поступать в краскозаготовительное отделение не позднее, чем за сутки до применения.

При получении материалов в таре поставщика необходимо проверить соответствие маркировки на трафарете или этикетках требуемой для работы марки материала.

Тара с лакокрасочными материалами должна быть плотно закупорена во избежание попадания влаги. Перед употреблением плёнка (если она имеется), образовавшаяся на поверхности материала, должна удаляться. Жидкий отстой с поверхности лакокрасочного материала сливать запрещается.

Вязкость всех лакокрасочных материалов до и после разведения определяется по вискозиметру ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм, если иное не указано в технической документации на лакокрасочный материал.

Лакокрасочный материал перед применением должен быть тщательно размешан деревянным веслом или пневматическим перемешивающим устройством до однородного состояния и полного поднятия осадка. Размешивание в таре весом более 50 кг должно быть механизировано. Перемешивающее устройство должно быть тщательно промыто перед использованием. Деревянные вёсла должны быть отдельными для каждого типа лакокрасочных материалов.

## Продолжение приложения А

Перед применением приготовленные к работе материалы необходимо профильтровать через специализированную воронку для фильтрования лакокрасочных материалов, или капроновую сетку, или два слоя марли.

Разбавление лакокрасочного материала должно производиться только после его тщательного перемешивания.

Дозировка материалов допускается как весовая, так и объёмная по мерной ёмкости или специальным мерным линейкам.

Транспортировка материалов из краскозаготовительного отделения на рабочее место производится путем перевозки на тележках в плотно закрытой таре, а в небольших количествах допускается транспортировка вручную.

Очистка методом дробеструйной обработки должна проводиться в дробеструйных камерах металлической дробью.

Все операции по окрашиванию должны производиться в окрасочных камерах.

Подготовленные к очистке рама вагона должны быть сухими и чистыми, без жировых и сажевых загрязнений.

Перед проведением подготовки поверхности к окраске организацией, производящей ремонт вагонов, должна быть произведена подготовка вагона для передачи в окрасочный комплекс – демонтаж навесного оборудования и неокрашиваемых деталей, препятствующих восстановлению покрытия (суфле, ручки дверей, поручни, высоковольтные приёмные розетки, решётки и пр.). В случае если при ремонте не производится демонтаж оконных блоков, то уплотнительные резинки должны быть также демонтированы. Данные операции выполняются вне окрасочного комплекса.

Сохранность защитных свойств лакокрасочного покрытия под не-демонтированными деталями не может быть обеспечена.

## Продолжение приложения А

Поверхности хребтовой балки всех типов вагонов должны быть очищены дробеструйным способом до степени 1 в соответствии с ГОСТ 9.402-2014 [36] от окалины, ржавчины и старого лакокрасочного покрытия.

Для дробеструйной очистки поверхностей хребтовой балки должны использоваться:

- стальная дробь по ГОСТ 11964-81 [24] размером от 0,2 до 1,0 мм;
- металлический песок или купершлак размером от 0,2 до 2,5 мм;
- электрокорунд размером от 0,2 до 1,0 мм.

Размерный состав металлической дроби при дробеструйной очистке хребтовой балки вагона и давление воздуха устанавливаются экспериментально в зависимости от толщины пленки удаляемых продуктов (краски, ржавчины) и толщины металлической поверхности вагона. Давление воздуха 7–9 кгс/см<sup>2</sup>.

Шероховатость металлической поверхности после дробеструйной очистки поверхности должна быть не более Rz-50.

В случае превышения значений по шероховатости поверхности осуществляется повторная обработка балки.

После дробеструйной обработки поверхность хребтовой балки должна быть обеспылена с помощью обдувки воздухом. Время до проведения операции окрашивания не должно превышать двух часов после окончания дробеструйной очистки и обдувки вагона.

Технологический процесс получения покрытия включает в себя следующие операции:

- подготовка поверхности под окраску в соответствии с ГОСТ 9.402-2014 [42];
- обдувка после дробеструйной обработки;
- обезжиривание поверхности после механической очистки и расчистки разрушенных мест;

## Продолжение приложения А

– обдувка воздухом, обезжиривание и протирка пылесборными салфетками.

Толщина высохшего лакокрасочного покрытия для первичных грунтовок (до операции шпатлевания) должна быть:

– не менее 50 мкм (при шероховатости не более Rz-30).

Сушка первого слоя покрытия проводится при температуре не более 60 °С и регламентируется характеристиками на выбранные материалы. Допускается естественная сушка при температуре не менее 20 °С в течение не более 2-х часов.

В условиях эксплуатации на окрашенных поверхностях подвагонного оборудования вагонов могут появляться механические повреждения покрытия от ударов металлическими предметами или камнями (щебнем), вследствие чего оно требует восстановления.

Вагон, подлежащий ремонтному восстановлению при механических повреждениях покрытия, должен подаваться на окрасочную позицию после проведения обмывки.

После обмывки вагон подготавливают к проведению ремонта дефектных поверхностей покрытия: закрепляют маскировочную бумагу малярной лентой на поверхности, не требующей окраски, т.е. изолируют поверхности от напыления лакокрасочных материалов.

Дефектные поверхности, подлежащие ремонту, должны быть расчищены дробеструйной обработкой. Расчистка должна проводиться от середины разрушения к краям.

Поверхность после расчистки должна быть обеспылена с помощью обдувки воздухом, обезжирена специальным обезжиривателем или протерта пылесборными салфетками (или аналогичными салфетками).

## Продолжение приложения А

Для ускорения процесса послойной сушки нанесенных на поверхность кузова материалов рекомендуется применять инфракрасные лампы типа «IRT» или аналогичные.

Окрашенная хребтовая балка вагон должна находиться в помещении до полного высыхания последнего слоя.

Контроль за выполнением работ при окраске вагонов должен производиться пооперационно с начала подготовки поверхности к окрашиванию и до сдачи вагона.

При окрашивании контролю подлежат: подготовка поверхности под окраску, число слоев окраски, качество сушки, толщина каждого слоя и общая толщина комплексного лакокрасочного покрытия на металлической поверхности пассажирского вагона, внешний вид лакокрасочных покрытий, а также температура и влажность воздуха в окрасочных помещениях, температура хребтовой балки вагона.

Температура и влажность воздуха в процессе окрашивания должны контролироваться термометрами, психрометрами, термогигрометрами или подобными приборами, установленными на всех этапах получения лакокрасочных покрытий. Температура хребтовой балки вагона должна контролироваться пирометрами или аналогичными приборами.

Наряду с контролем операций технологического процесса должен проводиться контроль качества лакокрасочного материала в условиях окрасочного производства в соответствии с техническими условиями, технической спецификации на материал и нормативной документацией: в процессе приготовления материала к нанесению контролируются правильность приготовления рабочих составов, однородность (визуально на отсутствие расслоений), вязкость по ГОСТ 8420-74 [39].

Контроль шероховатости поверхности и толщины должен производиться с помощью неразрушающего метода контроля с использованием магнитных и



## Продолжение приложения А

индукционных толщиномеров, обеспечивающих установленную техническими документами точность измерений:

- для определения толщины покрытия – «Константа-К5»;
- с датчиками для диэлектрических и электропроводящих неферромагнитных покрытий на электропроводящих ферромагнитных основаниях с использованием индукционных преобразователей ИД;
- с датчиками для диэлектрических покрытий на электропроводящих неферромагнитных основаниях с использованием параметрических преобразователей ПД;
- для определения шероховатости – «Константа-К5» с преобразователем ДШ;
- для определения толщины покрытия – «Константа-МК4» с датчиками;
- для диэлектрических и электропроводящих неферромагнитных покрытий на электропроводящих ферромагнитных основаниях с использованием индукционных преобразователей ИД;
- для диэлектрических покрытий на электропроводящих неферромагнитных основаниях с использованием параметрических преобразователей ПД;
- для определения толщины покрытия – «Elcometer» со всторенными и с выносными датчиками (в зависимости от модели):
  - типа F – для измерения немагнитных покрытий на основаниях из ферромагнитных металлов,
  - типа N – для непроводящих немагнитных покрытий на немагнитных металлических основаниях (цветных металлах),
  - датчики типа FNF с автоматическим распознаванием типа основания – для ферромагнитных и немагнитных металлических оснований,

## Продолжение приложения А

– для определения толщины покрытия – QuaNix 4500 на ферромагнитных и неферромагнитных металлических основаниях со встроенным датчиком, автоматически распознающим тип основания,

– или других толщиномеров.

Для контрольных измерений толщины покрытий выбирают от 8 до 10 точек по всей длине хребтовой балки. Толщина слоя каждого материала контролируется в одной и той же зоне по ГОСТ 31993-2014 [32] (за результат принимается среднее арифметическое значение всех измерений).

Приборы контроля, используемые при проведении технологических операций при окраске пассажирских вагонов, рекомендуется проводить периодическое обслуживание проверять в соответствии с ГОСТ Р 54931-2008 [47].

Количество слоев и качество нанесения должен контролировать ответственный руководитель, назначенный приказом по структурному подразделению.

Полностью окрашенный вагон перед эксплуатацией должен находиться в помещении на позициях организации, выполняющей ремонт, с температурой не ниже 15 °С не менее двух суток, при этом допускается выполнение других работ по ремонту вагона, не оказывающих негативного воздействия на лакокрасочное покрытие.

Допускается выдержка окрашенного вагона вне помещения при соблюдении температурного режима и отсутствии осадков.

Организация, оказывающая услуги по окраске вагонов, должна гарантировать соответствие лакокрасочных покрытий на окрашенных поверхностях вагонов требованиями ГОСТ Р 54893-2012 [46] при соблюдении условий эксплуатации, надлежащем уходе за окрашенной поверхностью, отсутствии воздействия химических веществ, не предусмотренных штатной эксплуатацией, а также отсутствии механических повреждений.

## Продолжение приложения А

Обмывка и очистка пассажирских вагонов в период эксплуатации должна производиться в соответствии с ГОСТ Р 54612-2011 [45].