

**ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ**

УДК 629.4.015

*А. В. ПУТЯТО, доктор технических наук, Е. Н. КОНОВАЛОВ, научный сотрудник, М. И. ПАСТУХОВ, кандидат технических наук, П. М. АФАНАСЬКОВ, научный сотрудник, Е. В. БУГАЕВА, соискатель, Н. В. БЕЛОГУБ, магистрант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

### **ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ВАГОНА ПАССАЖИРСКОГО ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Приведена методика определения остаточного ресурса несущей конструкции вагона пассажирского после длительной эксплуатации. Выполнены расчетные и экспериментальные исследования прочности металлоконструкции вагона пассажирского типа ПН, а также установлены значения физико-механических характеристик материала несущих элементов после 45 лет эксплуатации вагона. На основе расчетно-экспериментальной оценки получено, что несущая конструкция вагона обладает остаточным ресурсом не менее 13 лет эксплуатации.

**В**ведение. В настоящее время существенное количество единиц железнодорожного подвижного состава колеи 1520 мм как в Республике Беларусь, так и в других странах имеет срок службы, превышающий установленный заводом-изготовителем. В то же время многолетний опыт отраслевой научно-исследовательской лабораторией «Технические и технологические оценки ресурса единиц подвижного состава» (ОНИЛ «ТТОРЕПС») обследования технического состояния вагонов после длительной эксплуатации показывает, что указанный в Технических условиях срок службы в большинстве случаев далек от предельного. Во многом это связано как с существенным запасом прочности, заложенным при проектировании, так и с особенностями эксплуатации конкретного типа вагонов.

Не являются исключением и вагоны пассажирские постройки Тверского вагоностроительного завода, нормативных срок службы которых составляет 28 лет. В соответствии с [1, 2] вагону может быть продлен срок службы после проведения работ по техническому диагностированию при условии наличия остаточного ресурса, причем общий срок службы пассажирского вагона (с учетом продления), как правило, не должен превышать полуторного назначенного срока службы, указанного в Технических условиях завода-изготовителя на базовую модель, а при использовании в качестве вагонов специального назначения – не более 45 лет. В то же время для таких вагонов в исключительных случаях по отдельным методикам с учетом технического состояния и экономической целесообразности срок службы может составить не более двойного от назначенного заводом-изготовителем [2].

Таким образом актуальной является задача оценки остаточного ресурса несущей конструкции вагона пассажирского, эксплуатируемого в качестве специально-технического при сроке его службы свыше 45 лет.

Процедура оценки остаточного ресурса несущей конструкции вагона после длительной эксплуатации. Для оценки остаточного ресурса несущей конструкции вагона воспользуемся процедурой, предложенной в [3] и включающей следующие основные этапы:

1 Изучение технической документации, условий эксплуатации, анализ информации по проведению технических освидетельствований и ремонтов вагонов.

2 Разработка диагностических карт металлоконструкции вагона, выполнение визуального контроля, измерение толщин элементов конструкции, контроль сварных швов и основного металла, отбраковка вагонов, а также отбор образца с худшим техническим состоянием для проведения испытаний.

3 Разработка компьютерных моделей и выполнение виртуальных испытаний вагона с учетом фактических значений толщин элементов конструкции для определения соответствия деградированной конструкции требованиям актуальной нормативной документации.

4 Проведение натуральных контрольных испытаний несущей конструкции вагона при характерных режимах нагружения.

5 Анализ результатов расчетов и испытаний, установление проблемных зон несущей конструкции, разработка схемы вырезки образцов и их изготовление для исследования химического состава и физико-механических характеристик материала несущей конструкции.

6 Исследование химического состава и физико-механических свойств материала несущей конструкции вагона после длительной эксплуатации ( $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{1.1}$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ,  $HV$ ,  $KCU$ ).

7 Расчетно-экспериментальная оценка остаточного ресурса несущей конструкции вагона с учетом проведенных испытаний натурального объекта и установленных характеристик материала.

В рамках этапа 1 изучаются особенности конструкции вагона, устанавливаются материалы, из которых изготовлены несущие элементы, выполняется анализ информации по проведению технических освидетельствований и ремонтов, изучаются условия эксплуатации.

В рамках этапа 2 выполняется разработка диагностических карт, в которых наряду с указанием основных данных вагона (номер, год постройки, дата и место последнего ремонта и т. п.), устанавливается объем проведения технического обследования; указываются основные характеристики вагона и места определения фактической толщины металлоконструкции; приводятся результаты контроля сварных швов и основного металла; отмечаются наличие дефектов (трещин, деформаций и т. п.), а также характеристики применяемого оборудования. По результатам технического обследования выполняется отбраковка вагонов, не подлежащих

ремонту согласно действующей нормативной документации. Из обследованной партии вагонов отбирается образец (или образцы) для дальнейшего проведения контрольных испытаний.

В результате реализации этапа 3 выполнен комплекс расчетов на прочность при характерных режимах нагружения с учетом коррозионного износа элементов конструкции, установленного в результате технического обследования. Анализ результатов расчетов показал, что уровень напряжений не превышает допустимых значений, установленных в [4]. Также на основе результатов выполненных расчетов с учетом информации, полученной при техническом обследовании вагонов совместно со специалистами Испытательного центра БелГУТа, разработана схема наклейки тензометрических датчиков T1...T41 (рисунок 1) для дальнейшего проведения контрольных испытаний. Рассмотрим результаты

реализации последующих этапов методики подробнее.

**Результаты экспериментальных исследований.**

Отобранный образец (вагон) с наихудшим техническим состоянием на этапе 4 прошел комплекс контрольных испытаний, включающих режимы нагружения, характерные для эксплуатации: соударение вагонов, продольные нагрузки в составе поезда, сброс с клиньев (имитация вертикальных колебаний при эксплуатации).

На рисунке 2 приведены диаграммы амплитудных динамических напряжений для режима соударения вагонов при действии продольного усилия 2,5 МПа для контрольных точек T1...T41. Аналогично получены массивы данных амплитудных динамических напряжений в контрольных точках при других режимах нагружения.

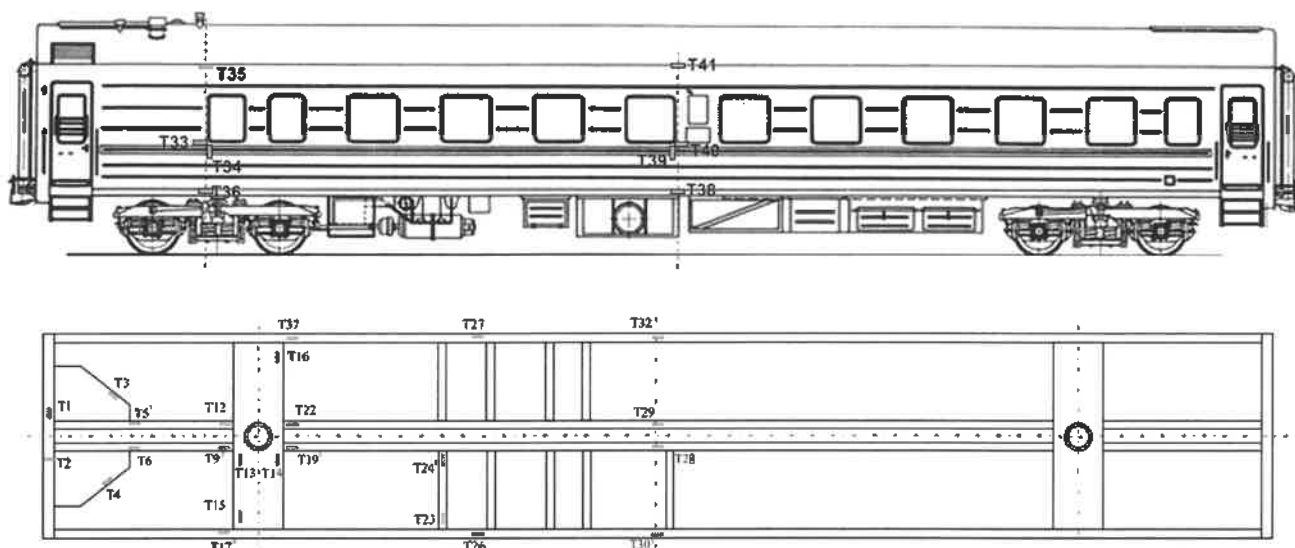


Рисунок 1 – Схема наклейки тензометрических датчиков T1...T41

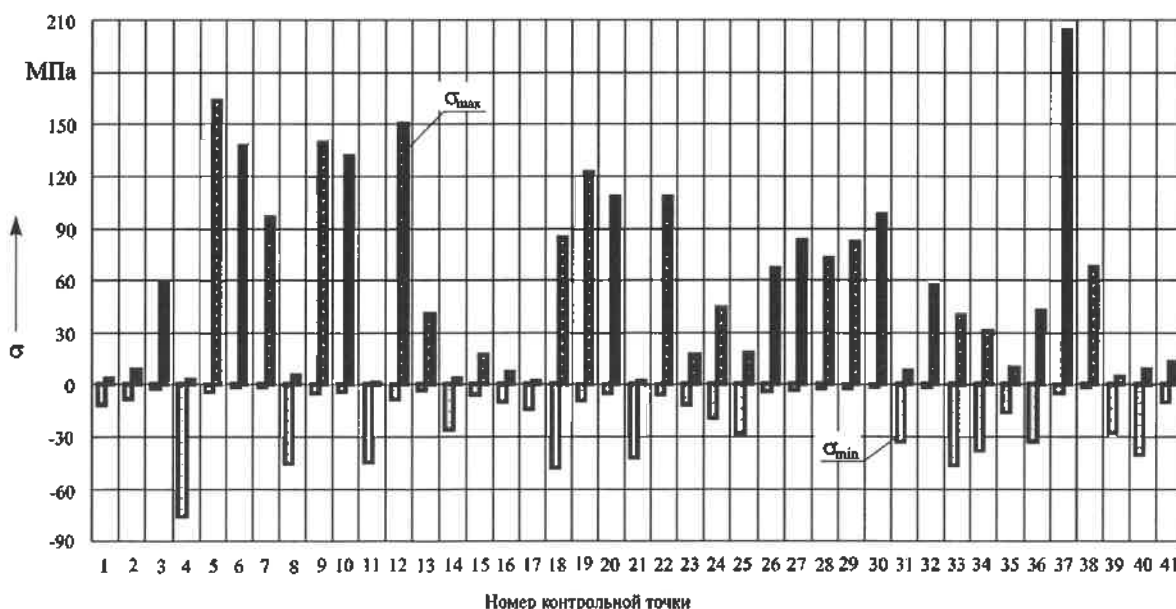


Рисунок 2 – Диаграммы амплитудных значений динамических напряжений для контрольных точек T1...T41 при ударном нагружении в автосцепное устройство силой 2,5 МН

Результаты расчетов и проведенных испытаний дают практически полную картину напряженно-деформированного состояния конструкции вагона. В то же время, учитывая его длительную эксплуатацию, необходимо знать информацию о фактических значениях физико-механических характеристик материала, из которого изготовлена несущая конструкция, определяющая остаточный ресурс вагона. Хребтовая балка подвергалась воздействию циклически изменяющейся нагрузки и в процессе длительной эксплуатации это может привести к зарождению и аккумуляции в отдельных областях дефектов, снижающих механические характеристики стали. Базируясь на полученных результатах расчетов и испытаний, на этапе 5 установили проблемные зоны несущей конструкции, из которых вырезаны образцы металла для исследования его химического состава и физико-механических свойств.

Сравнительный анализ химического состава исследуемого металла и состава сталей, регламентируемого п. 4.1 и таблицей 1 ГОСТ 380, проведенный на этапе 6, указывает на то, что элементы хребтовой балки вагона изготовлены из стали, химический состав которой соответствует стали углеродистой обыкновенного качества марки Ст3сп. Также установлены значения основных механических характеристик стали (предел текучести  $\sigma_T$ , предел прочности  $\sigma_B$ , относительное удлинение  $\delta$ , относительное сужение  $\psi$ ), которые представлены в таблице 1. Получено, что механические характеристики стали фрагментов хребтовой балки по показателю «Предел текучести» удовлетворяют требованиям ГОСТ 535, предъявляемым к стали Ст3сп. Значения показателя «Предел прочности» находятся вблизи верхнего предела, незначительно его превышая. Значения показателя «Относительное удлинение» несколько ниже значений, регламентированных ГОСТ 535, предъявляемым к стали Ст3сп.

Таблица 1 – Механические характеристики стали

Номер образца	$\sigma_T$	$\sigma_B$	$\delta$	$\psi$
	МПа	МПа	%	%
	Таблица 2 ГОСТ 535–2005			
	< 255	380–490	< 26	–
1	365	480	22,0	64
2	340	478	24,5	49
3	458	578	18,9	54
4	392	492	17,7	59
5	419	527	19,0	63
6	378	493	27,3	55
7	342	473	24,7	54
8	364	482	25,3	60
9	381	493	21,6	63
10	378	494	22,4	58

Приведенные в таблице 1 данные свидетельствуют о том, что относительное расхождение значений твердости в различных точках сечения вертикальной стенки не превышает  $\pm 10\%$ . Среднее значение твердости стали, из которой изготовлена вертикальная стенка хребтовой балки пассажирского вагона, по Бринеллю составляет 171 НВ, по Роквеллу – 86,4 HRB.

Показатель ударной вязкости характеризует сопротивление металла разрушению при воздействии ударных нагрузок и косвенно отражает его усталостную прочность. По результатам испытаний образцов установлено, что сталь хребтовой балки обладает удовлетворительным сопротивлением разрушению при воздействии ударной нагрузки ( $KCU = 88$  Дж/см<sup>2</sup>).

В таблице 2 приведены результаты экспериментального определения характеристик сопротивления усталости материала несущей конструкции.

Таблица 2 – Значения характеристик сопротивления усталости

Характеристика	Обозначение	Значение
Предел выносливости, МПа	$\sigma_{-1}$	145
Абсцисса точки перелома кривой усталости, цикл	$N_{G_0}$	$9,37 \cdot 10^6$
Коэффициенты уравнения кривой усталости	$a$	-0,125
	$b$	3,034
Показатель наклона левой ветви кривой усталости	$m_0$	8,0

В соответствии с данными для стали Ст3 с пределом прочности 425 МПа характерен предел выносливости 150 МПа.

Определение остаточного ресурса несущей конструкции вагона. Исходными данными для определения остаточного ресурса выступили фактические механические свойства материала после длительной эксплуатации вагона, а также результаты экспериментальных натурных исследований напряженного состояния металлоконструкции в контрольных точках (см. рисунок 1) при различных характерных режимах нагружения. Расчет остаточного ресурса выполнен по методике, изложенной в [3] с учетом следующих допущений:

- усталостное повреждение или разрушение материала вагона в основном происходит при упругом деформировании;
- параметром, определяющим циклическую прочность, является коэффициент запаса сопротивления усталости;
- справедлива линейная гипотеза суммирования усталостных повреждений;
- для неустановившегося режима нагружения амплитудные значения динамических напряжений приводятся к эквивалентному симметричному циклу.

В конечном итоге остаточный ресурс для каждой контрольной точки T1...T41 вычислялся по формуле

$$T_p = N_0 \frac{\left( \frac{\sigma_{a,N}}{[\sigma]} \right)^m}{\sum_k \left[ K^k \sum_i (\sigma_{ai}^k)^m \cdot P_i^k \right]}$$

где  $N_0$  – базовое число циклов,  $N_0 = 10^7$ ;  $\sigma_{a,N}$  – предел выносливости (по амплитуде) для контрольной зоны при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения при базовом числе циклов, который в отличие от нормативной методики определяется с учетом фактического предела выносливости материала после длительной эксплуатации и коэффициента снижения предела выносливости в выбранной контрольной зоне;

$[n]$  – минимально допустимый коэффициент запаса сопротивления усталости за выбранный срок службы;  $m$  – показатель степени в уравнении кривой усталости в амплитудах;  $K^k$  – коэффициент, связывающий суммарное число циклов динамических напряжений с расчетным суммарным сроком службы для  $k$ -го режима нагружения;  $\sigma_{ai}^k$  – уровень амплитуд напряжений в  $i$ -м интервале  $k$ -го режима нагружения;  $p_i^k$  – вероятность (частота) действия уровня амплитуд  $\sigma_{a,N}$  в  $i$ -м интервале  $k$ -го режима нагружения.

Опуская промежуточные расчеты, составим диаграмму (рисунок 3), где приведены результаты определения долговечности, в годах, для наиболее нагруженных контрольных зон.

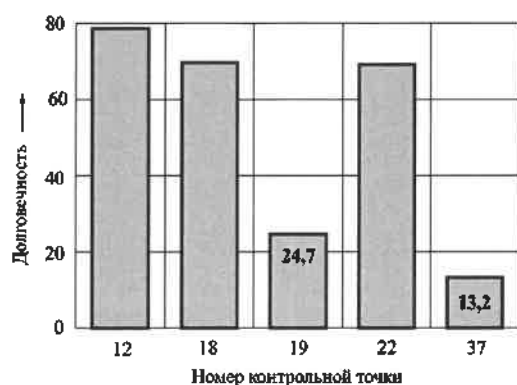


Рисунок 3 – Результаты определения долговечности

Таким образом, по результатам расчетно-экспериментальной оценки долговечности по критерию усталостной прочности опытного образца вагона после 45 лет эксплуатации, можно сделать заключение, что несущая металлоконструкция обладает остаточным ресурсом не менее 13 лет эксплуатации.

#### Заключение.

1 В результате обследования технического состояния металлоконструкций вагонов пассажирского типа ПН, постройки Тверского вагоностроительного завода

Получено 21.05.2020

A. V. Putsiata, Ye. N. Kanavalau, M. I. Pastubou, P. M. Afanaskou, Ye. V. Bugaeva, N. V. Belahub. Estimation of residual resource of a bearing construction of passenger railway car after long term operation.

The technique of definition of a residual resource of the bearing construction of passenger railway car after long term operation is presented. Theoretical and experimental researches of durability of a metal construction of passenger railway car type "ПН" after operation 45 years are executed. The actual physical and mechanical characteristics of material of a construction are established. On the basis of calculation and tests it is received that the bearing construction of the railway car has a residual resource not less than 13 years.

после длительной эксплуатации (свыше полуторного назначенного срока службы) установлен незначительный процент их отбраковки, что косвенно свидетельствует о наличии у них остаточного ресурса.

2 Выполнены расчетные и экспериментальные исследования прочности металлоконструкции вагона с наихудшим техническим состоянием по критерию коррозионного износа со сроком службы 45 лет, которые показали соответствие ее нормативным требованиям прочности.

3 Экспериментально установлены физико-механические характеристики материала несущей конструкции вагона после длительной эксплуатации, в том числе предел выносливости материала.

4 Выполнена расчетно-экспериментальная оценка остаточного ресурса несущей конструкции вагона пассажирского типа ПН на основе полученных экспериментальных данных прочностных испытаний натурального образца (вагона), а также фактических значений механических характеристик материала металлоконструкции после 45-летней эксплуатации. Установлено, что несущая конструкция вагона обладает остаточным ресурсом не менее 13 лет эксплуатации.

#### Список литературы

1 Положение о продлении срока службы пассажирских вагонов, курсирующих в международном сообщении : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества, протокол от 21–22 октября 2014 г. № 61. – М. : ВНИИЖТ, 2014. – 35 с.

2 СТБ 2534–2018 Железнодорожный подвижной состав. Порядок продления срока службы. Общие положения. – Минск : Госстандарт, 2018. – 21 с.

3 Путято, А. В. Прогнозирование остаточного ресурса вагона хоппер-дозатора после длительной эксплуатации с учетом фактических физико-механических характеристик материала несущей конструкции / А. В. Путято, Е. Н. Коновалов, П. М. Афанаськов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – № 1(34). – С. 26–35.

4 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колес 1520 мм (несамоходных) / ГосНИИВ-ВНИИЖТ. – М., 1983. – 260 с.