

УДК 629.4.027.2

## Ускоренный метод испытания боковых рам инновационной тележки модели 18-9891

В. А. Чернов<sup>1</sup>, Д. В. Даниленко<sup>2</sup>, Л. В. Цыганская<sup>1</sup>, С. О. Комиченко<sup>3</sup>, В. П. Ефимов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>2</sup>ООО «УК РМ РЕЙЛ», Российская Федерация, 430006, Саранск, ул. Лодыгина, 11

<sup>3</sup>АО «НВЦ «Вагоны», Российская Федерация, 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>4</sup>ООО «УИЦ — Вагоны», Российская Федерация, 622007, Нижний Тагил, ул. Орджоникидзе, 22, оф. 28

**Для цитирования:** Чернов В. А., Даниленко Д. В., Цыганская Л. В., Комиченко С. О., Ефимов В. П. Ускоренный метод испытания боковых рам инновационной тележки модели 18-9891 // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 643–656. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-643-656

### Аннотация

**Цель:** Научно обоснованный выбор и проведение экспериментальной отработки ускоренного метода усталостных испытаний литых несущих деталей инновационной тележки модели 18-9891. **Методы:** Применены методы экспериментальных исследований боковых рам тележки модели 18-9891 с нагрузкой на ось 25 тс (245 кН) с использованием метода Локати. Метод основан на гипотезе линейного суммирования относительных усталостных повреждений при испытании натурной детали ступенчато возрастающей во времени нагрузкой. **Результаты:** Полученные результаты усталостных испытаний свидетельствуют о том, что применение метода Локати обеспечивает получение параметров кривой усталости боковой рамы при испытании одного образца. Стандартная методика усталостных испытаний боковых рам требует проведение испытаний 9 натурных деталей. **Практическая значимость:** Применение нового ускоренного метода усталостных испытаний обеспечивает значительное снижение затрат времени, материалов и испытательных ресурсов, как на стадии изготовления опытных образцов, так и в серийном производстве литых несущих деталей тележек грузовых вагонов.

**Ключевые слова:** Грузовая тележка, рама боковая, усталостная прочность, ускоренный метод испытаний.

В последние годы проблема ускоренного определения предела выносливости материалов и натурных деталей приобрела особое значение, так как на предприятиях и в проектных организациях ограничены возможности проводить длительные и дорогостоящие испытания на усталость как образцов материалов, так и натурных элементов конструкций. Тем не менее развитие современной науки и техники в области вагоностроения требует расширения круга вопросов, подлежащих исследованию

в области усталости материалов и натурных деталей, в сжатые сроки.

Ускорение усталостных испытаний как на стадии изготовления опытных образцов, так и в серийном производстве литых несущих деталей тележек грузовых вагонов имеет большое значение. Снижение затрат времени, материалов и труда при проведении усталостных испытаний можно достигать путем изменения методических подходов. Большое значение имеет ускоренная оценка усталостной прочности натурных дета-

лей. Ускоренные испытания на ограниченном количестве деталей могут обеспечить в сжатые сроки оперативную оценку принятых технологических или конструктивных изменений.

Применение ускоренных методов испытаний литых деталей для оценки конструктивных и технологических изменений или замены марки стали целесообразно как с технической, так и с экономической точки зрения. Отработка ускоренных методов усталостных испытаний и их применения для контроля качества серийной продукции также приобретает большое значение для сокращения времени испытаний и материальных затрат на их проведение.

Выбор ускоренного метода испытаний обуславливается требуемой точностью данных, наличием определенного класса испытательных машин, трудоемкостью проведения испытаний и необходимым числом объектов испытаний. Анализ литературных данных по экспериментальной проверке ряда ускоренных методов испытаний в различных отраслях машиностроения как в РФ, так и за рубежом [1–3] показывает, что для исследования усталостной долговечности литых деталей на железнодорожном транспорте наиболее приемлемым и имеющим наибольшую точность при наименьшей трудоемкости является метод Локати.

Экспериментальные исследования по отработке ускоренного метода усталостных испытаний (метода Локати) проведены на рамах боковых инновационной тележки модели 18-9891 грузовых вагонов с нагрузкой на ось 25 тс (245 кН). Метод Локати основан на применении гипотезы линейного суммирования относительных усталостных повреждений деталей (образцов) [2, 4, 5]. На основании данной гипотезы считается, что усталостное разрушение детали наступает тогда, когда сумма относительных повреждений достигает единицы, т. е.:

$$\sum_{i=1}^{i=k} \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (1)$$

где  $n_i$  — число циклов нагружения детали на данном уровне нагрузки;

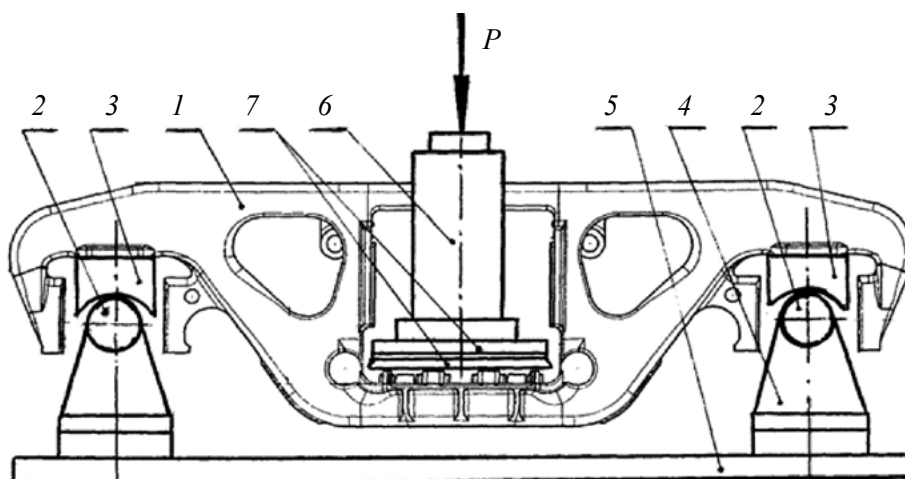
$N_i$  — число циклов до разрушения (долговечность) при этом же уровне нагрузки в условиях постоянной амплитуды;

$k$  — число уровней нагрузки.

Метод Локати получил наибольшее распространение, так как обеспечивает удовлетворительную точность оценки предела выносливости (в пределах +8%) при высоком коэффициенте ускорения испытаний по сравнению с применяемыми методами испытаний натуральных деталей на усталость.

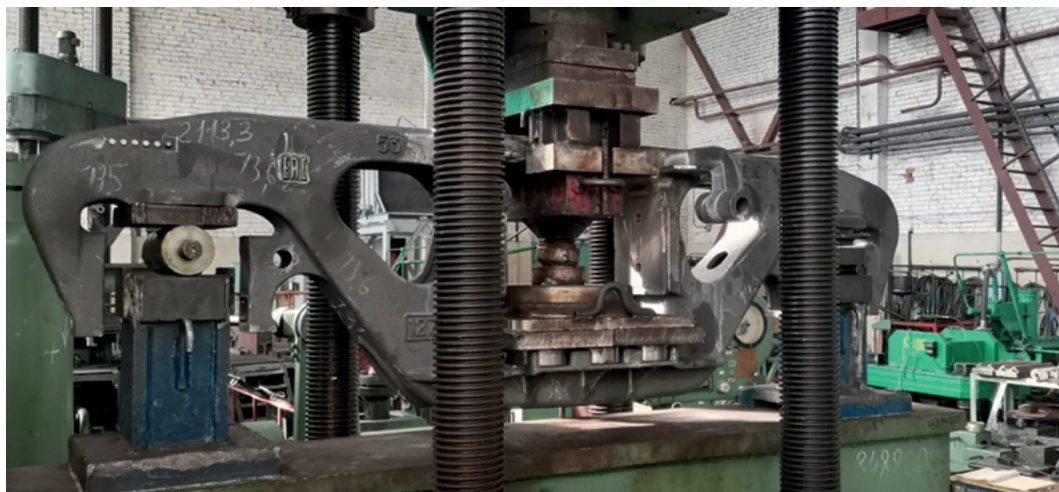
Рама боковая является основной несущей деталью трехэлементной двухосной тележки (изготовитель — ООО «ВКМ-Сталь»). Рамы боковые в соответствии с требованиями ГОСТ 33788—2016 [6] и других нормативных документов [7] должны подвергаться усталостным испытаниям для экспериментальной проверки сопротивления усталости с оценкой коэффициента запаса. В рамках проведения предварительных испытаний проведены усталостные испытания партии рам боковых, изготовленных по КД — черт. № 9891.01.00.001 [8]. Рамы боковые изготовлены из стали 20ГЛ, термообработка выполнена по технологии ООО «ВКМ-Сталь». Климатическое исполнение УХЛ 1 по ГОСТ 15150—69 [9].

Поставленные на испытания детали соответствовали требованиям КД, ТУ и ГОСТ 32400—2013 [10]. Отбор объектов испытаний проведен из имеющейся совокупности данной продукции методом отбора «вслепую» по ГОСТ 18321—73 [11] после ее приемки ОТК предприятия-изготовителя. Схема нагружения боковой рамы при проведении усталостных испытаний методом Локати приведена на рис. 1, общий вид ресурсных (на усталость) испытаний боковых рам приведен на рис. 2. Усталостные испытания боковых рам проведены по разработанной программе [12] с учетом требований методики [13].



**Рис. 1.** Схема нагружения боковой рамы:

1 — рама боковая; 2 — катковая опора; 3 — переходник; 4 — тумба опорная;  
5 — силовой стол станда; 6 — П-образное приспособление; 7 — система сегментов



**Рис. 2.** Общий вид усталостных испытаний рамы боковой тележки модели 18-9891 методом Локати на испытательной машине (автор фото — С. О. Комиченко)

Испытания проведены в лабораторном корпусе при температуре окружающего воздуха +15–20 °С и влажности 55–65%. Каждую деталь испытывали при асимметричном цикле до разрушения. Частота действия переменных нагрузок находилась в пределах 5–6 Гц. Испытания проводились в непрерывном режиме с визуальным контролем усталостных трещин. После обнаружения трещины длиной 15–25 мм испытания продолжались до разрушения детали или до потери несущей способности. Под потерей несущей способ-

ности понималось такое повреждение детали циклической нагрузкой, при котором дальнейшее нагружение детали становилось невозможным из-за значительного уменьшения жесткости.

Экспериментальную проверку использования метода Локати проводили на боковых рамах тележки модели 18-9891, которые предварительно были испытаны на усталость по стандартной методике [13]. Количество боковых рам в партии составляло 9 деталей. По результатам статистической обработки усталостных испытаний боковых

рам тележки модели 18-9891 построены кривые усталости в амплитудных нагрузках ( $P_a$ ) и числах циклов ( $N$ ) до разрушения [6, 7].

Результаты усталостных испытаний боковых рам подвергнуты вероятностно-статистической обработке согласно требованиям ГОСТ 33788—2016 [6] и «Норм...» [7]. Уравнение кривой усталости боковой рамы, представленной в виде степенной функции, имеет вид:

$$P_{ai}^m N_i = \text{const}, \quad (2)$$

где  $P_{ai}$  — амплитудное значение нагрузки при циклических испытаниях;

$N_i$  — число циклов до разрушения детали;

$m$  — показатель степени в уравнении кривой усталости.

Корреляционное уравнение кривой усталости (уравнение линии регрессии) детали в координатах  $(\lg P_a - \lg N)$ , отражающее средневероятное положение кривой усталости испытанных боковых рам, определяется по формуле:

$$\text{Lg}P_{a,N} = (\text{Lg}P_a)_{\text{cp}} + \frac{1}{m} (\text{Lg}N_i - \text{lg}N). \quad (3)$$

По уравнению линии регрессии вычисляется среднее (соответствующее вероятности  $a = 0,5$ ) значение предела выносливости при базовом числе  $N_0 = 10^7$  циклов по формуле:

$$(\text{Lg}P_a)_{0,5} = (\text{Lg}P_a)_{\text{cp}} + \frac{1}{m} [\text{Lg}N_0 - (\text{Lg}N)_{\text{cp}}]. \quad (4)$$

Коэффициент линейной корреляции экспериментальных данных определяется по формуле:

$$\rho = \frac{\sum_1^n [\lg P_{ai} - (\lg P_a)_{\text{cp}}] \cdot [\lg N_i - (\lg N)_{\text{cp}}]}{(n-1) \cdot S_{\lg P_{ai}} \cdot S_{\lg N}}. \quad (5)$$

Показатель степени  $m$  уравнения кривой усталости вида  $(P_{ai}^m \cdot N_i = \text{const})$  определяется по формуле:

$$m = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{S_{\text{Lg}N}}{S_{\text{Lg}P_a}}. \quad (6)$$

Логарифм минимального возможного значения предела выносливости в амплитудах при других значениях односторонней вероятности  $a$  определяется по формуле:

$$(\text{Lg}P_a)_a^{\min} = (\text{Lg}P_a)_{0,5} + Z_a (S_{\text{Lg}P_a}^* + S_o + S_s), \quad (7)$$

где  $Z_a = -1,645$  — квантиль нормального распределения для доверительной вероятности;  $a = 0,05$  (вероятность неразрушения деталей равна 0,95);

$S_{\text{Lg}P_a}^*$  — мера индивидуального рассеивания частных пределов ограниченной выносливости относительно линии регрессии;

$S_o$  — основная ошибка среднего выборочного значения предела выносливости;

$S_s$  — основная ошибка меры индивидуального рассеивания предела выносливости.

Параметры данных кривых усталости использовались для экспериментальной отработки ускоренного метода испытаний (метода Локати). Достоверность определения предела выносливости дополнительно проверялась оценкой величины коэффициента линейной корреляции  $\rho$ . Критические значения коэффициента корреляции  $[\rho]$  назначались по табл. 6 ГОСТ 33788—2016 [6].

Расчет основных статистических характеристик партии боковых рам приведен в табл. 1, кривая усталости, построенная в координатах  $(\lg P_a - \lg N)$ , показана на рис. 3.

Ускоренным методом Локати испытаны две боковые рамы. Испытания проведены при ступенчато-возрастающей нагрузке до разрушения детали. Режим испытаний, который является определяющим при ускоренных испытаниях по методу Локати, представляется следующим выражением:

Таблица 1. Результаты вероятностно-статистической обработки усталостных испытаний партии боковых рам

№ п/п	Наименование	Обозначение	Величина
1	Среднеквадратическое отклонение логарифма амплитуд нагрузки	$S_{LgP_a}$	0,03705
2	Среднеквадратическое отклонение логарифма долговечности деталей	$S_{LgN}$	0,28970
3	Коэффициент линейной корреляции экспериментальных данных	$\rho$	-0,86354
4	Мера индивидуального рассеивания частных пределов ограниченной выносливости относительно линии регрессии	$S_{LgP_a}^*$	0,01868
5	Основная ошибка среднего выборочного значения предела выносливости	$S_o$	0,00623
6	Основная ошибка меры индивидуального рассеивания предела выносливости	$S_\delta$	0,00467
7	Значение показателя степени в уравнении кривой усталости	$m$	-9,05451
8	Значение предела выносливости на базе $10^7$ циклов при $\alpha = 50\%$ вероятности неразрушения деталей	$(P_{a,N})_{0,5}$	27,45295
9	Минимальное значение предела выносливости на базе $10^7$ циклов при $\alpha = 95\%$ вероятности неразрушения деталей	$(P_{a,N})_{min}$	24,54286
10	Коэффициент запаса сопротивления усталости	$\tilde{n}$	3,90229

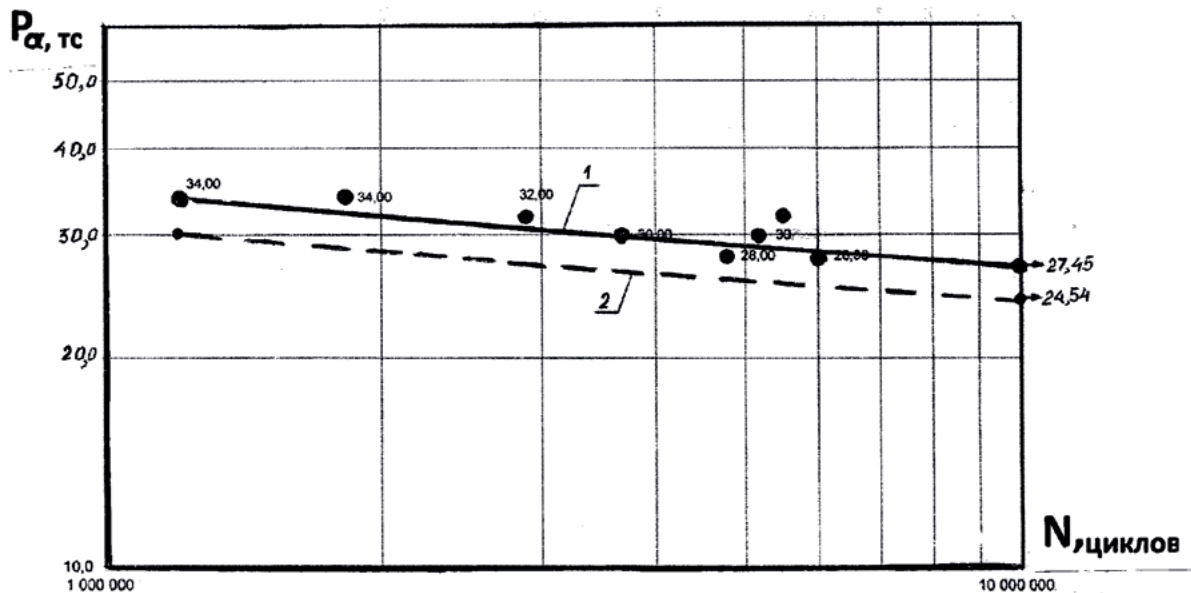


Рис. 3. Кривая усталости боковых рам тележки модели 18-9891 по результатам полных усталостных испытаний (9 деталей):  
 1 — вероятность неразрушения  $\alpha = 0,5$ ; 2 — вероятность неразрушения  $\alpha = 0,95$

$$T = \frac{\Delta P_{ai}}{n_i^1}, \quad (8)$$

где  $\Delta P_{ai}$  — изменение уровня нагрузки на ступени;

$n_i^1$  — число циклов перемен нагрузки на ступени.

Рамы боковые испытаны при двух режимах нагружения ступенчатовозрастающей нагрузкой:

Таблица 2. Режимы испытаний боковой рамы (черт. № 9891.01.00.001), первый режим испытаний

Число циклов нагружения на ступени, тыс.	Нагрузка, тс (кН)			
	$P_{cp}$	$P_a$	$P_{max}$	$P_{min}$
0–500	42 (411,6)	22 (215,6)	64 (627,2)	20 (196,0)
500–1000	42 (411,6)	24 (235,2)	66 (646,8)	18 (176,4)
1000–1500	42 (411,6)	26 (254,8)	68 (666,4)	16 (156,8)
1500–2000	42 (411,6)	28 (274,4)	70 (686,0)	14 (137,2)
До разрушения детали	42 (411,6)	30 (294,0)	72 (705,6)	12 (117,6)

Таблица 3. Режимы испытаний боковой рамы (черт. № 9891.01.00.001), второй режим испытаний

Число циклов нагружения на ступени	Нагрузка, тс (кН)			
	$P_{cp}$	$P_a$	$P_{max}$	$P_{min}$
I уровень 0...1,5 · 10 <sup>6</sup> циклов	42 (411,6)	25,5 (250,2)	67,5 (661,5)	16,5 (161,7)
II уровень 1,5 · 10 <sup>6</sup> ...3,0 · 10 <sup>6</sup> циклов	42 (411,6)	27,0 (264,9)	69,0 (676,2)	15,0 (147,0)
III уровень 3,0 · 10 <sup>6</sup> ... 4,5 · 10 <sup>6</sup> циклов	42 (411,6)	28,5 (279,6)	70,5 (690,9)	13,5 (132,3)
IV уровень До разрушения детали	42 (411,6)	30,0 (294,0)	72,0 (705,6)	12,0 (117,6)

Таблица 4. Результаты ускоренных усталостных испытаний боковой рамы (черт. № 9891.01.00.001) по методу Локати (первый режим нагружения) — заводской № 20164

Нагрузка на ступени $P_{ai}$ , тс (кН)	Число циклов нагружения на ступени, $n_i$ ( $\times 10^3$ )
22 (215,6)	500
24 (235,2)	500
26 (254,8)	500
28 (274,4)	500
30 (294,0)	4796 (до образования трещины) 4859 (разрушение детали)

Режим I.  $T = 0,4 \cdot 10^{-5}$  тс/цикл ( $\Delta P_{ai} = 2$  тс;  $n_i^1 = 5 \cdot 10^5$  циклов);

Режим II.  $T = 1,0 \cdot 10^{-6}$  тс/цикл ( $\Delta P_{ai} = 2,5$  тс;  $n_i^1 = 1,5 \cdot 10^6$  циклов).

На каждом режиме испытано по одной боковой раме (черт. № 9891.01.00.001).  $T$  характеризует среднюю скорость роста амплитудных значений силы в процессе испытаний при ступенчато-возрастающей нагрузке и принимается постоянной при проведении испытаний методом Локати.

Таблица 5. Результаты испытаний боковой рамы 20164 (черт. № 9891.01.00.001) на последней ступени нагружения

№ рамы боковой	Число циклов нагружения, тыс.:		Место разрушения
	до образования трещины	до разрушения или потери несущей способности	
20164	4796	4859	Угол рессорного проема

Режимы испытаний приведены в табл. 2 и 3. Испытания боковых рам при ступенчатовозрастающей нагрузке проведены на двух режимах.

Результаты ускоренных усталостных испытаний боковых рам (черт. № 9891.01.00.001) по методу Локати (первый режим нагружения) приведены в табл. 4.

Результаты испытаний боковой рамы на последней ступени нагружения приведены в табл. 5. Зона и характер разрушения боковой рамы показаны на рис. 4.



**Рис. 4.** Характер и зона усталостного разрушения боковой рамы 20164 тележки модели 18-9891 (черт. № 9891.01.00.001) (автор фото — С. О. Комиченко)

Таблица 6. Результаты ускоренных усталостных испытаний боковой рамы (черт. № 9891.01.00.001) по методу Локати (II режим нагружения) — заводской № 20162

Нагрузка на ступени $P_{ai}$ , тс (кН)	Число циклов нагружения на ступени, ( $n_i$ )
25,5 (250,2)	$1,5 \cdot 10^6$
27,0 (264,9)	$1,5 \cdot 10^6$
28,5 (279,6)	$1,5 \cdot 10^6$
30,0 (294,0)	$3,867 \cdot 10^6$ (до образования трещины) $4,098 \cdot 10^6$ (разрушение детали)

Таблица 7. Результаты испытаний боковой рамы 20162 (черт. № 9891.01.00.001) на последней ступени нагружения

№ рамы боковой	Число циклов нагружения, тыс.:		Место разрушения
	до образования трещины	до разрушения или потери несущей способности	
20162	3867	4098	Угол рессорного проема

Результаты ускоренных усталостных испытаний боковых рам (черт. № 9891.01.00.001) по методу Локати (II режим нагружения) приведены в табл. 6.

Результаты испытаний боковой рамы на последней ступени нагружения приведены

в табл. 7. Зона и характер разрушения боковой рамы показан на рис. 5.

На рис. 6 приведена графическая иллюстрация усталостных испытаний боковых рам тележки модели 18-9891 (черт. № 9891.01.00.001) ступенчато-возрастающей нагрузкой (методом Локати) при двух режимах нагружения. Кривые усталости боковых рам на рис. 6 приведены по амплитудному значению силы при вероятностях неразрушения  $a = 0,20$ ;  $a = 0,50$  и  $a = 0,95$ , при средней нагрузке цикла  $P_m = 42$  тс (412 кН).

Число циклов  $n_i$ , где  $i = 1, \dots, k-1$  ( $k$  — номер ступени, на которой произошло разрушение) принимается постоянным (см. табл. 5 и 7). Для оценки ( $P_{ar}$ ) при вероятности неразрушения  $a$  левая ветвь кривой усталости представляется статистически (см. рис. 6). Далее вычислены три суммы накопленных повреждений:

$$(\sum n_i / N_i)^u; (\sum n_i / N_i)^*; (\sum n_i / N_i)^0. \quad (9)$$

Предел выносливости — случайная величина, которая находится в переходной области кривой усталости. Расчетная оценка сумм накопленных усталостных повреждений охватывает всю переходную область вынос-



Рис. 5. Характер и зона усталостного разрушения боковой рамы 20162 тележки модели 18-9891 (черт. № 9891.01.00.001) (автор фото — С. О. Комиченко)

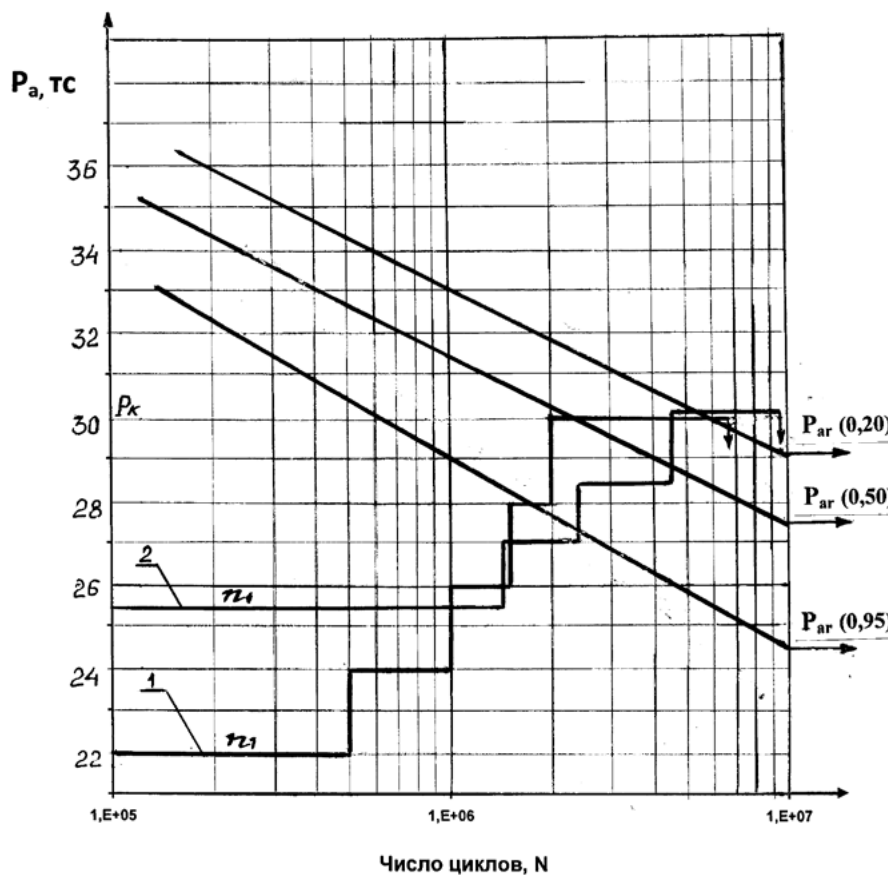


Рис. 6. Графическая иллюстрация усталостных испытаний боковых рам ступенчатовозрастающей нагрузкой при двух режимах нагружения: 1 — I режим нагружения; 2 — II режим нагружения



Таблица 8. Результаты вычисления суммы относительной долговечности боковой рамы (черт. № 9891.01.00.001) — I режим испытаний (№ рамы боковой 20164)

Ступни (уровни) нагружения боковой рамы	Амплитуда циклической нагрузки на ступени ( $P_{ai}$ ), тс (кН)	Число циклов нагружения на ступени ( $n_i$ )	Долговечность на данном режиме, при $P = 0,20$ . $N_p$ , (циклов)	$(n_i / N_i)$	Долговечность на данном режиме, при $P = 0,50$ . $N_p$ , (циклов)	$(n_i / N_i)$	Долговечность на данном режиме, при $P = 0,95$ . $N_p$ , (циклов)	$(n_i / N_i)$
1 ступень	22 (215,6)	$0,5 \cdot 10^6$	$7,1 \cdot 10^8$	0,001	$82 \cdot 10^6$	0,006	$3,6 \cdot 10^7$	0,014
2 ступень	24 (235,2)	$0,5 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^8$	0,003	$18 \cdot 10^6$	0,028	$1,1 \cdot 10^7$	0,046
3 ступень	26 (254,8)	$0,5 \cdot 10^6$	$6,2 \cdot 10^7$	0,009	$12 \cdot 10^6$	0,042	$4,7 \cdot 10^6$	0,107
4 ступень	28 (274,4)	$0,5 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^7$	0,025	$7,6 \cdot 10^6$	0,066	$1,8 \cdot 10^6$	0,287
5 ступень (до разрушения)	30 (294,0)	$4,859 \cdot 10^6$	$6,1 \cdot 10^6$	0,084	$2,3 \cdot 10^6$	2,104	$6,4 \cdot 10^5$	7,592
$(\sum n_i / N_i)a = 0,20 = 0,122$ ; $(\sum n_i / N_i)a = 0,50 = 2,246$ ; $(\sum n_i / N_i)a = 0,95 = 8,037$								

Таблица 9. Результаты вычисления суммы относительной долговечности боковой рамы (черт. № 9891.01.00.001) — II режим испытаний (№ рамы боковой 20162)

Ступни (уровни) нагружения боковой рамы	Амплитуда циклической нагрузки на ступени ( $P_{ai}$ ), тс (кН)	Число циклов нагружения на ступени ( $n_i$ )	Долговечность на данном режиме, при $P = 0,20$ . $N_p$ , (циклов)	$(n_i / N_i)$	Долговечность на данном режиме, при $P = 0,50$ . $N_p$ , (циклов)	$(n_i / N_i)$	Долговечность на данном режиме, при $P = 0,95$ . $N_p$ , (циклов)	$(n_i / N_i)$
1 ступень	25,5 (250,2)	$1,5 \cdot 10^6$	$16,44 \cdot 10^7$	0,009	$12,91 \cdot 10^7$	0,012	$5,92 \cdot 10^6$	0,253
2 ступень	27,0 (264,9)	$1,5 \cdot 10^6$	$12,90 \cdot 10^7$	0,011	$10,31 \cdot 10^7$	0,015	$2,87 \cdot 10^6$	0,522
3 ступень	28,5 (279,6)	$1,5 \cdot 10^6$	$11,65 \cdot 10^7$	0,012	$5,96 \cdot 10^6$	0,251	$1,44 \cdot 10^6$	1,042
4 ступень (до разрушения)	30,0 (294,0)	$4,098 \cdot 10^6$	$5,82 \cdot 10^6$	0,740	$2,93 \cdot 10^6$	1,393	$6,21 \cdot 10^5$	6,599
$(\sum n_i / N_i)a = 0,20 = 0,736$ ; $(\sum n_i / N_i)a = 0,50 = 1,673$ ; $(\sum n_i / N_i)a = 0,95 = 8,418$								

ливости боковых рам — от верхней кривой усталости при вероятности неразрушения  $P_{(0)} = 0,20$  (рис. 6) до нижней кривой усталости при вероятности неразрушения  $P_{(u)} = 0,95$ . На рис. 6 приведена также средняя кривая усталости при вероятности неразрушения  $P(*) = 0,50$ . Левые ветви кривых усталости представлены в вероятностном аспекте. При усталостных испытаниях методом Локати возможно определение только медианы предела выносливости детали (см. рис. 7 и 8).

При выполнении расчетов по методу Локати приняты следующие обозначения:

$P_{(u)}$  и  $P_{(0)}$  — вероятность безотказной работы на нижней и верхней границах переходной области соответственно;

$P_{ar}$  — предел выносливости детали на базе  $N_0 = 10^7$  циклов;

$P_1$  — значение силы на начальной (первой) ступени нагружения;

$k$  — номер ступени, на которой происходит разрушение;

$n_i$  — число циклов на  $i$ -ой ступени нагружения;

$P_k$  — значение испытательной нагрузки, при которой произошло разрушение детали на последней ступени нагружения;

$n_k$  — число циклов на последней ступени нагружения;

$P_{ai}$  — значение силы на  $i$ -ой ступени нагружения;

$N_k$  — число циклов нагружения при разрушении детали;

В табл. 8 и 9 приведены результаты вычисления суммы  $\sum n_i / N_i$  — отношение чисел циклов, пройденных боковой рамой на каждой ступени нагружения ( $n_i$ ), к ресурсу долговечности по кривой усталости на этих же уровнях нагрузки (рис. 6).  $N_i$  определялось из корреляционного уравнения кривой усталости (формулы 4 и 7) при различной вероятности неразрушения детали.

На рис. 7 приведены графики зависимости суммы относительных долговечностей ( $\sum n_i / N_i$ ) от соответствующих условным кривым усталости (см. рис. 6) пределов выносливости. Кривые приведены для двух режимов ступенчатого нагружения боковых рам методом Локати.

По полученным графикам определены значения пределов выносливости  $P_{ar}$  (0,50), соответствующие  $(\sum n_i / N_i) = 1$  (согласно теории линейного суммирования). Искомые значения предела выносливости боковых рам при оценке по I режиму испытаний методом Локати составили величину  $P_{ar} = 27,38$  тс (268,32 кН) при  $(\sum n_i / N_i) = 1$ . При оценке по II режиму испытаний методом Локати искомое значение предела выносливости боковых рам составило величину  $P_{ar} = 28,3$  тс (277,34 кН) при  $(\sum n_i / N_i) = 1$  — согласно линейной гипотезе суммирования усталостных повреждений.

По результатам полученных значений  $(\sum n_i / N_i)$  при определенной вероятности неразрушения рам боковых (табл. 9) построен график зависимости  $[\lg(\sum n_i / N_i) - P_{ar}]$ , по которому графически определен предел выносливости детали методом Локати (II режим нагружения). На рис. 8 показан данный график в логарифмических координатах: при  $[(\sum n_i / N_i)a = 0,20] =$

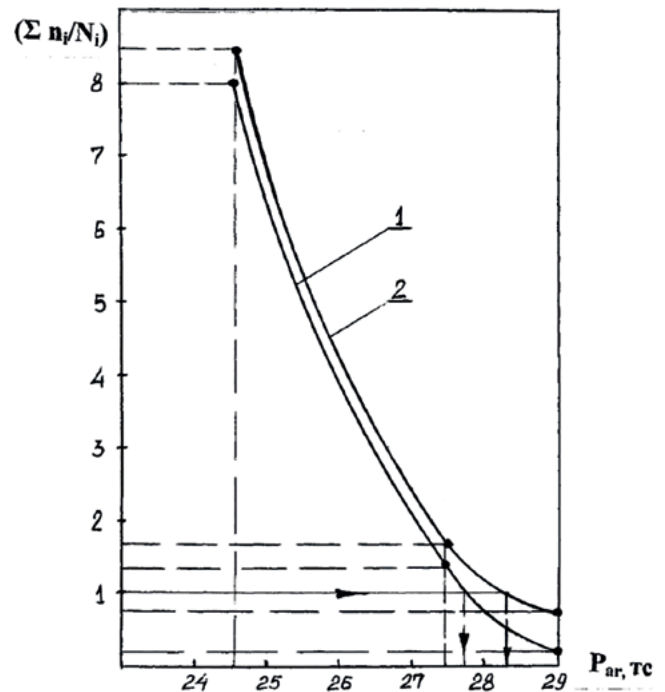


Рис. 7. Графическое определение предела выносливости боковых рам тележки модели 18-9891 (черт. № 9891.01.00.001) по результатам испытаний методом Локати: 1 — I режим нагружения; 2 — II режим нагружения

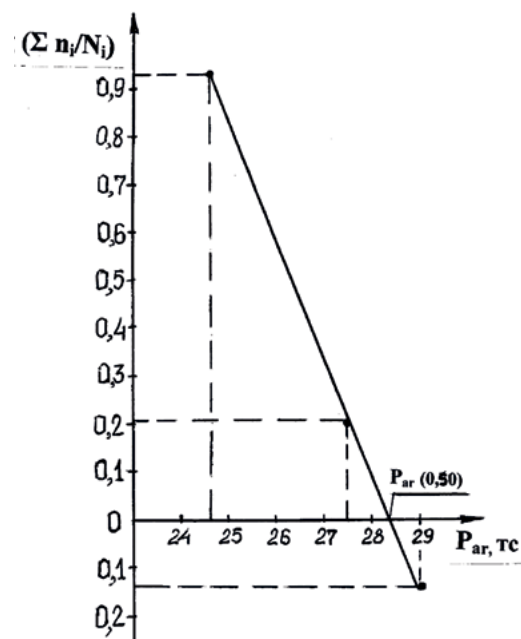


Рис. 8. Графическое определение предела выносливости боковых рам тележки модели 18-9891 (черт. № 9891.01.00.001) по результатам испытаний методом Локати (II режим нагружения)

Таблица 10. Результаты сравнительных испытаний боковых рам тележки модели 18-9891 (черт. № 9891.01.00.001) по методу Локати и стандартным методом

Режим испытаний	Обычные испытания		Ускоренные испытания методом Локати				Коэффициент ускорения
	Кол-во испытанных б/рам	Предел выносливости, $(P_{ar})$ , тс (кН)	Кол-во испытанных б/рам	$T$ , тс/цикл	Значение $P_{ar}$ , тс (кН) при $n_i/N_i = 1$ и $p = 0,50$	Отклонения величин пределов выносливости б/рам, %	
См. рис. 3	9	27,45 (269,0)					
I режим			1	$0,4 \cdot 10^{-5}$	26,0 (254,8)	5,28	15,135
II режим			1	$1,0 \cdot 10^{-6}$	28,4 (278,32)	3,34	20,404

$= 0,736$ ,  $\lg 0,736 = -0,133$ ,  $P_{ar} = 29,1$  тс; при  $[(\sum n_i / N_i)a = 0,50] = 1,673$ ,  $\lg 1,673 = 0,221$ ,  $P_{ar} = 27,45$  тс; при  $[(\sum n_i / N_i)a = 0,95] = 8,418$ ,  $\lg 8,418 = 0,925$ ,  $P_{ar} = 24,54$  тс. По графику определен предел выносливости боковых рам при вероятности неразрушения  $a = 0,50$ , при  $(\sum n_i / N_i) = 1$ , который составил  $P_{ar} = 28,4$  тс (278,32 кН).

Сравнительные результаты усталостных испытаний боковых рам, тележки модели 18-9891 (черт. № 9891.01.00.001), испытанных по стандартной методике (9 деталей), и усталостных испытаний методом Локати (1 деталь) приведены в табл. 10.

Уменьшение времени испытаний по методу Локати (коэффициент ускорения) в сравнении со временем испытаний, проводимых обычным методом (полные усталостные испытания боковых рам), определяется по суммарному числу циклов. Результаты сравнений величин предела выносливости, определенных двумя методами (испытания по стандартной методике — 9 деталей и ускоренные усталостные испытания методом Локати — 1 деталь) показывают, что имеет место достаточно хорошее их совпадение. Испытания боковой рамы по I режиму:  $P_{ar}(0,50) = 26$  тс (254,8 кН) — методом Локати;  $P_{ar} = 27,45$  тс (269,01 кН) — стандартный метод испытаний. Отклонение при этом составило:

$$\Delta = [P_{ar} - P_{ar}(0,50)] / P_{ar} \cdot 100\% = (27,45 - 26,0) / 27,45 \cdot 100\% = 5,28\%.$$

Испытания боковой рамы по II режиму:  $P_{ar}(0,50) = 28,4$  тс (278,32 кН) — методом Локати;  $P_{ar} = 27,45$  тс (269,01 кН) — стандартный метод испытаний. Отклонение при этом составило:

$$\Delta = [P_{ar} - P_{ar}(0,50)] / P_{ar} \cdot 100\% = (28,4 - 27,45) / 28,4 \cdot 100\% = 3,34\%.$$

Как видно, метод Локати дает достаточно точные результаты, и этим методом можно пользоваться для определения предела выносливости литых рам боковых тележек грузовых вагонов.

### Заключение

1. На стадии изготовления опытных боковых рам тележек грузовых вагонов рекомендуется применять ускоренный метод испытаний (метод Локати). Предложенный метод позволяет значительно сократить время и испытательные ресурсы при проведении конструктивно-технологической доводки деталей.

2. При наличии кривой усталости, построенной по результатам длительных испытаний аналогичных конструкций рам боковых, метод Локати применим в качестве контрольного испытания с использованием одного образца натурной детали.

3. Метод Локати можно использовать при обработке новых вариантов боковых рам тележек с технологическими и конструктивными изменениями для определения предела выносливости деталей и коэффициента запаса усталостной прочности в вероятностном аспекте.

4. Отклонения значений предела выносливости, полученных при испытаниях одной детали методом Локати, от величин этого показателя, полученных при испытаниях обычным методом (не менее 9 деталей), колеблются в пределах от 3,3% до 5,3%.

### Список источников

1. Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний: справочник / Л. М. Школьник. — М.: Metallurgia, 1978. — 304 с.

2. Олейник Н. В. Линейная гипотеза усталостных повреждений и ускоренное определение предела выносливости деталей / Н. В. Олейник, П. И. Греченко // Проблемы прочности. — 1989. — № 3. — С. 113–115.

3. Гольд Б. В. Основы прочности и долговечности автомобилей / Б. В. Гольд и др. — М.: Машиностроение, 1967. — 157 с.

4. Рекомендации по ускоренному определению пределов выносливости методом Локати. — М.: ВНИИНМАШ, 1971. — 41 с.

5. РД 50-686—89. Методические указания. Надежность в технике. Методы ускоренных испытаний на усталость для оценки пределов выносливости материалов, элементов машин и конструкций.

6. ГОСТ 33788—2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества.

7. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ГосНИИВ-ВНИИЖТ. — М., 1996. — 317 с.

8. КД. Рама боковая: чертеж № 9891.01.00.001 / ФГБОУ ВО ПГУПС.

9. ГОСТ 15150—69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных клима-

тических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

10. ГОСТ 32400—2013. Рама боковая и балка наддресорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия.

11. ГОСТ 18321—73. Статистический контроль качества. Методы случайного отбора выборок штучной продукции.

12. Тележки двухосные грузовых вагонов. Модель 18-9891 с нагрузкой на ось 25 тс (245 кН) и модель 18-9801 с нагрузкой на ось 23,5 тс (230 кН). Рамы боковые. Программа и методика ускоренных испытаний на усталость методом Локати / ООО «УИЦ-Вагоны». — Нижний Тагил, 2024. — 33 с.

13. Наддресорные балки и боковые рамы литые двухосных тележек грузовых вагонов колеи 1520 мм. Методики испытаний на усталость / ОАО «ВНИИЖТ» — ОАО «НИИ вагоностроения». — 2010. — 14 с.

Дата поступления: 03.06.2025

Решение о публикации: 16.07.2025

### Контактная информация:

ЧЕРНОВ Владимир Александрович — доц. кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; chernov-nt@mail.ru  
ДАНИЛЕНКО Денис Викторович — руководитель департамента; ddv051976@mail.ru

ЦЫГАНСКАЯ Людмила Валериевна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; tcyganskaya@gmail.com

КОМИЧЕНКО Станислав Олегович — заместитель руководителя; stanislav.komichenko@nvc-vagon.ru

ЕФИМОВ Виктор Петрович — канд. техн. наук, доц., генеральный директор; uiz123456@mail.ru

## Accelerated Test Method for the Side Frames of the 18–9891 Model Innovative Bogie

V. A. Chernov<sup>1</sup>, D. V. Danilenko<sup>2</sup>, L. V. Tsyganskaya<sup>1</sup>, S. O. Komichenko<sup>3</sup>, V. P. Efimov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

<sup>2</sup>LLC “RM RAIL Management Company”, 11, Lodygina str., Saransk, 430006, Russian Federation

<sup>3</sup>JSC “Research and Development Center “Wagons”, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

<sup>4</sup>LLC “UIC – Wagons”, 22, Ordzhonikidze str., of. 28, Nizhny Tagil, 622007, Russian Federation

**For citation:** Chernov V. A., Danilenko D. V., Tsyganskaya L. V., Komichenko S. O., Efimov V. P. Accelerated Test Method for the Side Frames of the 18-9891 Model Innovative Bogie // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 643–656. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-643-656

### Summary

**Purpose:** To substantiate the selection and experimental development of an accelerated fatigue test of cast load-bearing parts of the 18-9891 Model innovative bogie. **Methods:** The experimental study of the 18-9891-Model bogie side frames with an axle load of 25 tons (245 kN) was conducted using the Locati method. The method under discussion is based on the hypothesis of linear summation of relative fatigue damages occurring during the testing of a full-scale component under conditions of gradually increasing loads over a given period of time. **Results:** The fatigue test results demonstrate that the Locati method is an effective means of ensuring the parameters of the side frame fatigue curve obtained when testing a single sample. The standard fatigue testing procedure for side frames necessitates the testing of nine full-scale components. **Practical significance:** The implementation of a novel accelerated fatigue testing method will lead to substantial reductions in time, materials and testing resources, both during the manufacturing of prototypes and in the mass production of cast load-bearing parts for freight wagons.

**Keywords:** Load-bearing bogie, side frame, fatigue strength, accelerated test method.

### References

1. Shkol'nik L. M. *Metodika ustalostnykh ispytaniy: spravochnik* [Fatigue testing methodology: reference book]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1978, 304 p. (In Russian)

2. Oleynik N. V., Grechenko P. I. Lineynaya gipoteza ustalostnykh povrezhdeniy i uskorennoe opredelenie predela vynoslivosti detaley [Linear hypothesis of fatigue damage and accelerated determination of parts fatigue limit]. *Problemy prochnosti* [Strength problems]. 1989, Iss. 3, pp. 113–115. (In Russian)

3. Gold B. V. et al. *Osnovy prochnosti i dolgovechnosti avtomobiley* [Fundamentals of strength and durability of vehicles]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1967, 157 p. (In Russian)

4. *Rekomendatsii po uskorenному opredeleniyu predelov vynoslivosti metodom Lokati* [Recommendations for accelerated determination of fatigue limits by Lokati method]. Moscow: VNIINMASH Publ., 1971, 41 p. (In Russian)

5. *RD 50-686—89. Metodicheskie ukazaniya. Nadezhnost' v tekhnike. Metody uskorennykh ispytaniy na ustalost' dlya otsenki predelov vynoslivosti materialov, elementov mashin i konstruktsey* [RD 50-686—89. Guidelines. Reliability in engineering. Methods of accelerated fatigue tests for assessing fatigue limits of materials, machine elements and structures]. (In Russian)

6. *GOST 33788—2016. Vagoni gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i dinamicheskie kachestva*

[GOST 33788—2016. Freight and passenger cars. Methods of strength and dynamic quality tests]. (In Russian)

7. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya novykh i moderniziruemyykh vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Standards for calculation and design of new and modernized railway cars of the MPS gauge 1520 mm (non-self-propelled)]. Moscow: GosNIIV-VNIIZhT Publ., 1996, 317 p. (In Russian)

8. *KD. Rama bokovaya: chertezh № 9891.01.00.001* [Side frame: drawing № 9891.01.00.001]. FGBOU VO PGUPS. (In Russian)

9. *GOST 15150—69. Mashiny, pribory i drugie tekhnicheskie izdeliya. Ispolneniya dlya razlichnykh klimaticheskikh rayonov. Kategorii, usloviya ekspluatatsii, khraneniya i transportirovaniya v chasti vozdeystviya klimaticheskikh faktorov vneshney sredy* [GOST 15150—69. Machines, instruments and other technical products. Versions for various climatic regions. Categories, operating conditions, storage and transportation in terms of climatic factors of the external environment]. (In Russian)

10. *GOST 32400—2013. Rama bokovaya i balka nadressornaya litye telezhek zheleznodorozhnykh gruzovykh vagonov. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 32400—2013. Side frame and cast bolster beam of railway freight car bogies. Technical conditions]. (In Russian)

11. *GOST 18321—73. Statisticheskiy kontrol' kachestva. Metody sluchaynogo otbora vybork v shchutchnoy produkcii* [GOST 18321—73. Statistical quality control. Methods of random sampling of piece products]. (In Russian)

12. *Telezhki dvukhosnye gruzovykh vagonov. Model' 18-9891 s nagruzkoy na os' 25 ts (245 kN) i model' 18-9801*

*s nagruzkoy na os' 23,5 ts (230 kN). Rama bokovaya. Programma i metodika uskorennykh ispytaniy na ustalost' metodom Lokati* [Two-axle freight car bogies. Model 18-9891 with axle load 25 t (245 kN) and model 18-9801 with axle load 23.5 t (230 kN). Side frame. Program and methodology of accelerated fatigue tests by the Lokati method]. Nizhny Tagil: OOO “UITs-Vagony”, 2024, 33 p. (In Russian)

13. *Nadressornye balki i bokovye ramy litye dvukhosnykh telezhek gruzovykh vagonov kolei 1520 mm. Metodiki ispytaniy na ustalost'* [Cast bolster beams and side frames of two-axle freight car bogies with 1520 mm gauge. Fatigue testing methodologies]. OAO “VNIIZhT” — OAO “NII vagonostroeniya”, 2010, 14 p. (In Russian)

Received: June 03, 2025

Accepted: July 16, 2025

#### Author's information:

Vladimir A. CHERNOV — Associate Professor, Department of Wagons and Wagon Maintenance; chernov-nt@mail.ru

Denis V. DANILENKO — Head of the Department; dddv051976@mail.ru

Lyudmila V. TSYGANSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Wagons and Wagon Maintenance; tcyganskaya@gmail.com

Stanislav O. KOMICHENKO — Deputy Head of the Research Center; stanislav.komichenko@nvc-vagon.ru

Viktor P. EFIMOV — PhD in Engineering, Associate Professor, General Director; uiz123456@mail.ru