

Л. В. Цыганская, В. А. Чернов, Д. Г. Бейн

ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ БОКОВЫХ РАМ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Аннотация. В процессе эксплуатации периодически выявляются трещины в литых деталях тележек грузовых вагонов, угрожающие безопасности движения, что требует новых подходов к теоретической и практической оценке процесса трещинообразования в вагонных конструкциях. Особую актуальность приобретает проблема прогнозирования трещиностойкости конструкций на этапе проектирования. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования трещинообразования в литых элементах тележки с осевой нагрузкой 25 т/ось. По коэффициентам интенсивности напряжений в вершинах трещин и трещиноподобных дефектов в буксовом узле боковой рамы определены размеры и конфигурация начальных дефектов, при которых возможен рост трещин. Смоделированы и проанализированы условия раскрытия и распространения трещин. Проведены экспериментальные исследования ресурса боковых рам тележки с осевой нагрузкой 25 т/ось и сопоставлены с результатами моделирования. Предложены подходы к оценке трещиностойкости боковых рам тележек грузовых вагонов, позволяющие точнее прогнозировать возможность трещинообразования в литых элементах тележки в эксплуатации. Отдельные результаты исследований использованы при разработке новых боковых рам для тележек с осевой нагрузкой 25 т/ось.

Ключевые слова: тележка, боковая рама, трещина, механика разрушения, коэффициент интенсивности напряжений.

Для цитирования: Цыганская, Л. В. Оценка трещиностойкости боковых рам тележек грузовых вагонов при проектировании / Л. В. Цыганская, В. А. Чернов, Д. Г. Бейн // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 211–218. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_211.

Введение

Трещины, возникающие в литых элементах тележек грузовых вагонов, опасны прежде всего тем, что их рост может мгновенно привести к излому детали. Любой излом боковой рамы или наддресорной балки трехэлементной тележки грузового вагона – это аварийная ситуация, угрожающая безопасности движения. Поэтому так важно на всех этапах жизненного цикла тележек грузовых вагонов, начиная от проектирования, производства, испытаний и заканчивая эксплуатацией, прогнозировать, выявлять и исключать саму возможность возникновения и развития трещин, способных привести к серьезным аварийным ситуациям.

По вопросам возникновения трещин в литых элементах тележек грузовых вагонов в эксплуатации накоплен достаточно большой опыт. Основной причиной появления и развития трещин являются циклические знакопеременные нагрузки, связанные с колебаниями грузового вагона на рессорном подвешивании.

В основу традиционных методов теоретических и экспериментальных исследований усталостной прочности вагонных конструкций положена известная гипотеза линейного суммирования повреждений [1]

$$\sum n_i/N_i = 1, \quad (1)$$

где n_i – число циклов приложенной нагрузки; N_i – число циклов до разрушения, определенное по кривой усталости при постоянной амплитуде) [3].

Оценка соответствия требованиям [1] вагонных металлоконструкций ведется по коэффициенту запаса сопротивления усталости, который определяется как отношение предела выносливости составной части вагона к амплитуде динамических напряжений, приведённой к базовому числу циклов $N_0 = 10^7$.

Экспериментальная оценка процесса возникновения и развития трещин в литых элементах тележки выполняется в ходе проведения ресурсных испытаний по [2].

Имеющиеся стандартизированные методы оценки запаса сопротивления усталости, основанные на эмпирических зависимостях теории усталостной прочности, до сих пор являются основными при проектировании вагонных конструкций.

При этом механика разрушения, в основе которой лежит энергетический критерий Гриффитса, устанавливающий зависимость между нагрузкой, приложенной к конструкции, и длиной дефекта, позволяет не только прогнозировать возможность роста трещин, но и теоретически оценивать размеры дефектов, при которых рост трещин возможен.

Основная задача проведенных исследований – предложить метод и порядок оценки возможности развития трещин в литых элементах тележек грузовых вагонов на этапе проектирования с использованием основных положений механики разрушения.

При этом были поставлены следующие задачи:

- оценить параметры (размеры и конфигурацию) дефектов, при которых возможно раскрытие трещины;
- провести сравнение полученных теоретических результатов с экспериментальными исследованиями.

Методы исследования

Процесс наступления предельных состояний в соответствии с основными положениями механики разрушения состоит из двух стадий зарождения трещины и ее распространения [5].

Первая стадия оценивается по энергетическим или силовым критериям – критериям разрушения. Оценка по силовым критериям – коэффициентам интенсивности напряжений, предложенным в 1957 году Дж. Ирвингом, в настоящее время получила более широкое распространение. Методы оценки, доступные в широкой инженерной практике, заключаются либо в использовании справочных данных по коэффициентам интенсивности напряжений или в использовании программных продуктов, реализующих метод конечных элементов [3].

С практической точки зрения для литых элементов тележек грузовых вагонов интересен не только вопрос возможности развития трещин, но и параметры трещиноподобных дефектов, которые могут перейти в стадию роста.

Для прогнозирования роста трещины, как правило, используют закон Париса или зависимости, полученные на его основе, связывающие скорость зарождения и роста трещины с коэффициентами интенсивности напряжений.

Скорость роста трещины $\frac{dl}{dN}$ и ее длина, выраженная через амплитуду напряжений [4]:

$$\frac{dl}{dN} = A(Y(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})\sqrt{l})^n, \quad (2)$$

где A и n – эмпирические коэффициенты; Y – тарированная поправка к коэффициенту интенсивности напряжений; σ_{\max} , σ_{\min} – минимальное и максимальное напряжение цикла нагружения; l – длина трещины; $Y(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})\sqrt{l}$ – коэффициент интенсивности напряжений ΔK , выраженный через размах амплитуд напряжений.

Проинтегрировав выражение (2), можно получить численное значение длины трещины, при этом вычисление такого интеграла представляет определенную сложность, поэтому в инженерной практике используются различные упрощения, например, тарированные коэффициенты принимаются постоянными величинами.

Вычисление J-интеграла может быть выполнено методом конечных элементов, что позволяет повысить точность вычисления [6]. Для оценки возможности роста трещины в литых деталях разрабатываемой тележки грузовых вагонов с осевой нагрузкой 25 т/ось использовался программный комплекс ANSYS.

Основными повреждающими эксплуатационными нагрузками для конструкций тележек грузовых вагонов являются вертикальные динамические, синусоидально изменяющиеся во времени и связанные с колебаниями кузова на рессорном подвешивании. При этом для расчетной и экспериментальной оценки ресурса согласно [2, 3] рекомендовано учитывать также продольные и боковые силы, в значительной мере влияющие на общее напряженно-деформированное состояние деталей тележек.

При выполнении настоящей работы была проведена сравнительная оценка влияния каждой силы на процесс трещинообразования в боковой балке грузовой тележки. Работы проводились в три этапа.

Этап 1. Оценка коэффициентов интенсивности напряжений при нагрузках, установленных для оценки ресурса [3], позволяющего определить величины начальных дефектов, при которых возможен рост поверхностных и внутренних дефектов в узлах грузовых вагонов.

Проведены многовариантные расчеты при различных величинах начальных дефектов в диапазоне 1–3 мм.

Оценивались дефекты различной конфигурации: полуэллиптические, эллиптические и произвольной формы. Дефекты располагались в зонах возможного трещинообразования боковой рамы тележки.

Характерная структура сетки конечных элементов в зоне полуэллиптического дефекта с минимальным радиусом эллипса $r_{\min} = 1$ мм и максимальным радиусом $r_{\max} = 5$ мм ($\frac{r_{\min}}{r_{\max}} = \frac{1}{5}$) показана на рис. 1.

J -интеграл (по шести контурам) и коэффициенты интенсивности напряжений нормального отрыва, поперечного сдвига и продольного сдвига K_I, K_{II}, K_{III} от совместного действия нагрузок (продольной, вертикальной и боковой) показаны на рис. 2 и 3 соответственно.

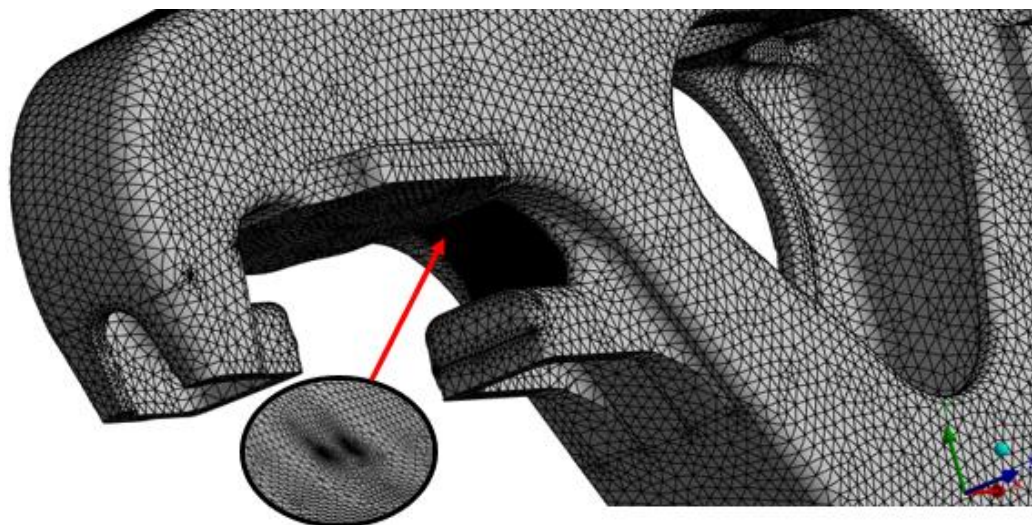


Рис. 1. Структура сетки конечных элементов в зоне заложенного дефекта

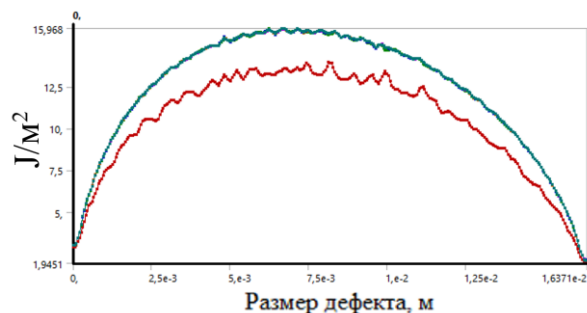


Рис. 2. J -интеграл для полуэллиптической трещины с радиусами эллипса $r_{\min} = 1$ мм и $r_{\max} = 5$ мм J/M^2

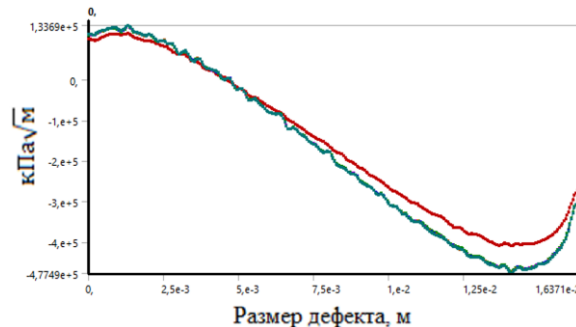


Рис. 3. Коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} для полуэллиптической трещины с радиусами эллипсов $r_{\min} = 1$ мм, $r_{\max} = 5$ мм

В результате проведенных расчетов установлено, что на величину значений J -интеграла и коэффициентов интенсивности напряжений в значительной мере влияют не только размеры дефекта, но и его расположение относительно направления главных напряжений в конструкции, что также следует и из основных соотношений механики разрушения (2).

Например, для эллиптического дефекта с отношением радиусов эллипсов ($\frac{r_{\min}}{r_{\max}} = \frac{1}{5}$), у которого большая ось эллипса расположена параллельно относительно оси пути, максимальное значение J -интеграла по первому контуру интегрирования в 5,7 раза больше, чем при расположении такого же дефекта перпендикулярно оси пути.

В результате исследований на первом этапе установлено следующее:

– наибольшее влияние на рост трещины оказывает глубина расположения дефекта, так как при расположении подповерхностного дефекта на глубине, сопоставимой с размером дефекта, максимальное значение J -интеграла может быть на порядок больше, чем при его поверхностном расположении;

– анализ коэффициентов интенсивности для различных дефектов зон расположения не позволил установить характерные зависимости, позволяющие дать рекомендации для их использования в инженерной практике.

Этап 2. Анализ вклада каждой нагрузки в процесс роста трещины в буксовом проеме боковой балки.

Приток упругой энергии в случае роста трещины от одной нагрузки при условии приращения трещины вдоль исходной прямой [7]:

$$G = \frac{1-\nu^2}{E} K_I^2 + \frac{1-\nu^2}{E} K_{II}^2 + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2, \quad (3)$$

где K_I^2 – коэффициент интенсивности напряжений нормального отрыва; K_{II}^2 – коэффициент интенсивности напряжений поперечного сдвига; K_{III}^2 – коэффициент интенсивности напряжений продольного сдвига; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости материала.

Выражение, позволяющее установить связь между одновременным действием двух нагрузок и коэффициентами интенсивности напряжений для плоской деформации, полученное путем приравнивания значений коэффициентов интенсивности напряжений через выражение потока энергии (2) и интегрирования по поверхности трещины, имеет вид

$$\frac{1-\nu^2}{E} \left(K_I^{(1)} K_I^{(2)} + K_{II}^{(1)} K_{II}^{(2)} \right) = \int_0^{+l} p_i^{(1)} \frac{du_i^{(2)}}{dl} dx + \int_0^{-l} p_i^{(1)} \frac{du_i^{(2)}}{dl} dx, \quad (4)$$

где l – длина трещины; $K_I^{(1)} K_I^{(2)}$ – коэффициенты интенсивности нормального отрыва от 1-й и 2-й системы нагружения; $K_{II}^{(1)} K_{II}^{(2)}$ – коэффициенты интенсивности поперечного сдвига от 1-й и 2-й системы нагружения; $p_i^{(1)}$ – первая нагрузка, действующая на трещину; $du_i^{(2)}$ – перемещения, вызванные второй нагрузкой $p_i^{(2)}$.

Как видно из выражения (3), установление явной зависимости от двух и большего числа нагрузок представляет определенные сложности при объемном деформировании тела. При этом исследование влияния различных нагрузок на процесс разрушения боковых рам тележек представляет определенный интерес с точки зрения нормирования вертикальных, боковых и продольных сил при выборе характеристик рессорного подвешивания тележек. При расчете по классическим зависимостям [2] основной вклад в усталостное разрушение литых деталей тележек вносят вертикальные силы (до 90 %), при этом вклад боковых сил является незначительным и не превышает 1–2 %.

Результаты расчета коэффициентов интенсивности напряжений от действия вертикальных, боковых и продольных сил приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты интенсивности напряжений для эллиптической трещины в буксовом проеме с соотношением радиусов эллипсов $\left(\frac{r^{\min}}{r^{\max}} = \frac{1}{5}\right)$

| Расчетная нагрузка | Коэффициент интенсивности напряжений | | |
|--|--|---|--|
| | нормального отрыва K_I , кПа $\sqrt{м}$ | поперечного сдвига K_{II} , кПа $\sqrt{м}$ | продольного сдвига K_{III} , кПа $\sqrt{м}$ |
| Совместное действие продольной, вертикальной, боковой нагрузок | 1,86·103 | 9,12·102 | 6,79·102 |
| Действие вертикальной нагрузки | 1,78·103 | 9,2·102 | 2,61·102 |
| Действие боковой нагрузки | 12,016 | 3,6·102 | 6,79·102 |
| Действие продольной нагрузки | 83,280 | 43,66 | 12,32 |

Как видно из табл. 1, на коэффициент интенсивности напряжений продольного сдвига для эллиптического дефекта, расположенного в буксовом проеме, в большей степени влияет действие боковой нагрузки.

Назначение допускаемых пороговых значений коэффициентов интенсивности напряжений, определенных по стандарту [1] на этапе теоретических исследований, представляет определенную сложность, поэтому допускаемые значения приняты из работы [4].

Согласно [4], для стали 20ГЛ пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений составляет $K_{IC} = 14 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ($14 \cdot 10^3 \text{ кПа}\sqrt{\text{м}}$).

Как видно из результатов, представленных в табл. 1, полученные коэффициенты интенсивности напряжений при заданной величине трещины с соотношением радиусов $\left(\frac{r^{\min}}{r^{\max}} = \frac{1}{5}\right)$ значительно меньше порогового значения.

Распределения рассмотренных коэффициентов интенсивности напряжений по длине дефекта для эллиптической трещины в буксовом проеме показаны на рис. 4–6.

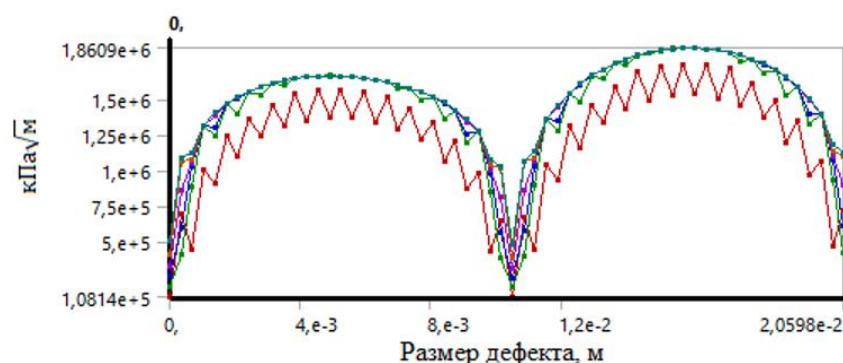


Рис. 4. Коэффициент интенсивности напряжений нормального отрыва K_I для эллиптической трещины в буксовом проеме при $r^{\min} = 1 \text{ мм}$, $r^{\max} = 5 \text{ мм}$

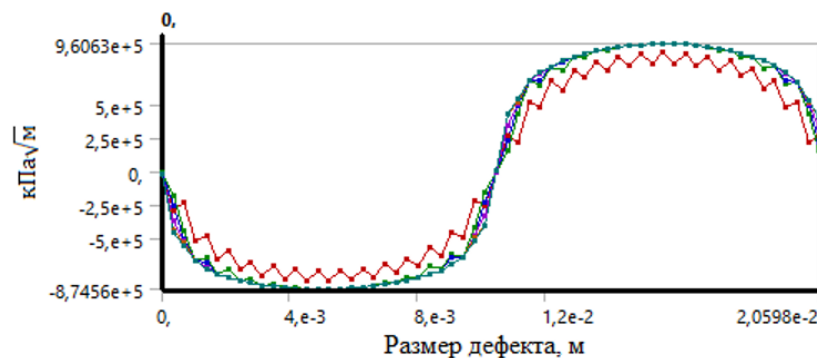


Рис. 5. Коэффициент интенсивности напряжений поперечного сдвига K_{II} для эллиптической трещины в буксовом проеме при $r^{\min} = 1 \text{ мм}$, $r^{\max} = 5 \text{ мм}$

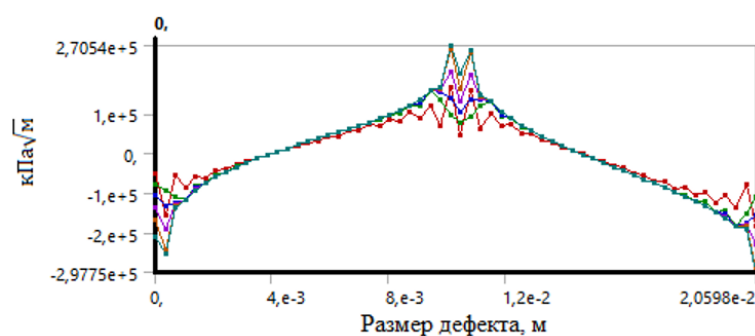


Рис. 6. Коэффициент интенсивности напряжений продольного сдвига K_{III} для эллиптической трещины в буксовом проеме при $r^{\min} = 1 \text{ мм}$, $r^{\max} = 5 \text{ мм}$

Этап 3. Сравнение результатов моделирования и испытаний.

Для оценки возможности роста трещины при циклическом нагружении использовался Smart-метод и уравнение NASGRO [10, 11].

Полученные результаты сравнивались с экспериментальными значениями (табл. 2), для сравнения рассматривались два случая возникновения трещины в зоне буксового проема тележки.

Таблица 2

Сравнение результатов моделирования и испытаний при амплитуде переменной силы 334 кН

| Номер испытания | Число циклов нагружения до трещины $N_{тр}$ | Экспериментальное число циклов нагружения до потери несущей способности N_i | Теоретическая оценка скорости роста трещины до достижения критического размера $1/3$ сечения балки (потеря несущей способности), число циклов |
|-----------------|---|---|---|
| 01 | 1 594 000 | 1 821 000 | 1 345 000 |
| 02 | 985 000 | 1 205 000 | |

На рис. 7 показана визуализация начального роста трещины в зоне буксового проема до достижения размера 10 мм при расчетном числе циклов $N_{тр} = 898 \cdot 103$.

Размеры дефекта, глубина его расположения, форма, место расположения, ориентация – все это создает значительные неопределенности для точной оценки параметров роста трещины методами механики разрушения. Чтобы применять данный метод в практической области для литых деталей грузовых вагонов, требуется больший объем экспериментальных данных.

При этом, если использовать подходы механики разрушения в области грузового вагоностроения, на этапе проектирования возможна оценка не только потенциальной возможности роста трещины, но и скорости роста, что принципиально важно с точки зрения возможности обнаружения трещин в эксплуатации и предотвращения аварийных ситуаций, угрожающих безопасности движения.

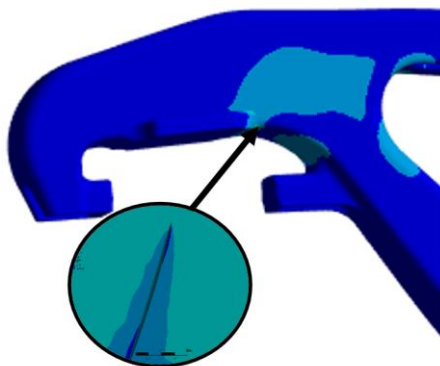


Рис. 7. Начало роста трещины в зоне внутреннего радиуса буксового проема

Заключение

С учетом вероятностного характера размеров и расположения дефектов предложенный подход к оценке трещиностойкости боковых рам тележек грузовых вагонов может быть использован:

- для сравнения технических решений конструкций боковых рам между собой;
- при выборе технических решений конструкций боковых рам на этапе проектирования.

Практическое использование предложенной оценки трещиностойкости конструкции нашло применение при отработке технологических и конструктивных изменений в процессе разработки новой тележки с осевой нагрузкой 25 т/ось.

Список литературы

1 ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещи-

References

1 GOST 25.506-85. Design, calculation and strength testing. Methods of mechanical testing of metals. Determination of crack resistance characteristics (fracture toughness) under static loading :

нотойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении : утвержден постановлением Госстандарта СССР от 27.03.1985 N 902. – Москва : Стандартиформ, 2005. – 38 с.

2 **ГОСТ 33211–2014.** Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам (с Поправкой, с Изменением № 1) : утвержден приказом Росстандарта № 565-ст от 05.06.2015. – Москва : Стандартиформ, 2020. – 54 с.

3 **ГОСТ 33939–2016.** Детали литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Методы ресурсных испытаний : утвержден приказом Росстандарта от 28.03.2017 N 201-ст. – Москва : Стандартиформ, 2019. – 24 с.

4 **Татаринцев, В. А.** Влияние эксплуатационных факторов на циклическую трещиностойкость сталей литых корпусов запорной арматуры / В. А. Татаринцев, А. К. Толстошеев // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2014. – № 1 (37). – С. 102–107. – EDN SCORVR.

5 **Когаев, В. П.** Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность : справочник / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. – Москва : Машиностроение, 1985. – 224 с.

6 Метод конечных элементов в механике разрушения / Е. М. Морозов, Г. П. Никишков. – Изд. 2-е, испр. – Москва : URSS, 2020. – 254 с. – ISBN 978-5-397-07410-0.

7 **Морозов, Е. М.** ANSYS в руках инженера : Механика разрушения / Е. М. Морозов, А. Ю. Муйземнек, А. С. Шадский. – Москва : Стереотип, 2024. – 454 с. – ISBN 978-5-9519-4619-5.

8 **Партон, В. З.** Механика разрушения : от теории к практике / В. З. Партон. – Изд. 2-е. – Москва : URSS, 2007. – ISBN 978-5-382-00157-9.

9 **Бороненко, Ю. П.** Уточнение методики расчета коэффициентов локальной концентрации напряжений в сварных соединениях вагонных конструкций / Ю. П. Бороненко, Л. В. Цыганская, Д. А. Василенко // Транспорт Урала. – 2009. – № 2 (21). – С. 69–72. – EDN KTYQQB.

10 Оценка процесса развития трещин в оси колесной пары // Железные дороги мира. – 2011. – № 2. – С. 41–45. – EDN NUDKQH

11 **Матвиенко, Ю. Г.** Двухпараметрическая механика разрушения / Ю. Г. Матвиенко. – Москва : Физико-математическая литература, 2020. – 210 с. – ISBN 978-5-9221-1899-6.

approved by the Resolution of the USSR State Standard of 27.03.1985, No 902. – Moscow, Standartinform, 2005. – 38 p.

2 **GOST 33211–2014.** Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities (with Amendment, with Change No. 1) : approved by the Order of Rosstandart No. 565-st dated 05.06.2015. – Moscow, Standartinform, 2020. – 54 p.

3 **GOST 33939–2016.** Cast parts of railway freight car bogies. Resource testing methods : approved by order of Rosstandart dated 28.03.2017 N 201-st. – Moscow : Standartinform, 2019. – 24 p.

4 **Tatarintsev, V. A.** The influence of operational factors on cyclic crack resistance of steels of cast bodies of shut-off valves / V. A. Tatarintsev, A. K. Tolstosheev // Modern high-tech technologies. Regional application. – 2014. – No. 1 (37). – P. 102–107. – EDN SCORVR.

5 **Kogaev, V. P.** Calculations of machine parts and structures for strength and durability : handbook / V. P. Kogaev, N. A. Makhutov, A. P. Gusenkov. – Moscow : Mashinostroenie, 1985. – 224 p.

6 Finite element method in fracture mechanics / E. M. Morozov, G. P. Nikishkov. – 2nd ed., corrected. – Moscow : URSS, 2020. – 254 p. – ISBN 978-5-397-07410-0.

7 **Morozov, E. M.** ANSYS in the hands of an engineer : Fracture mechanics / E. M. Morozov, A. Yu. Muiyemnek, A. S. Shadskiy. – Moscow : Stereotype, 2024. – 454 p. – ISBN 978-5-9519-4619-5.

8 **Parton, V. Z.** Fracture Mechanics: From Theory to Practice / V. Z. Parton. – 2nd ed. – Moscow : URSS, 2007. – ISBN 978-5-382-00157-9.

9 **Boronenko, Yu. P.** Clarification of the calculation method for local stress concentration coefficients in welded joints of wagon structures / Yu. P. Boronenko, L. V. Tsyganskaya, D. A. Vasilenko // Transport of the Urals. – 2009. – No. 2 (21). – P. 69–72. – EDN KTYQQB.

10 Evaluation of the process of crack development in the axle of a wheel pair // Railways of the world. – 2011. – No. 2. – P. 41–45.

11 **Matvienko, Yu. G.** Two-parameter fracture mechanics / Yu. G. Matvienko. – Moscow : Physical and Mathematical Literature, 2020. – 210 p. – ISBN 978-5-9221-1899-6.

L. V. Tsyganskaya, V. A. Chernov, D. G. Bein

ASSESSMENT OF CRACK RESISTANCE OF SIDE FRAMES OF FREIGHT CAR BOGIES DURING DESIGN

Abstract. The existing problem of cracks in cast parts of freight car bogies periodically detected during operation, threatening traffic safety, requires new approaches to theoretical and practical assessment of the crack formation process in car structures. The problem of predicting crack resistance of structures at the design stage is of relevance. Method Theoretical and experimental studies of crack formation in cast elements of a bogie with an axial load of 25 t / axle were performed. Results: The sizes and configuration of initial defects, at which crack growth is possible, were determined based on the stress intensity factors at the crack tips and crack-like defects in the axle box assembly of the side frame. The conditions for crack opening and propagation were modeled and analyzed. Experimental studies of the resource of side frames of a bogie with an axial load of 25 t / axle were carried out and compared with the modeling results. Practical significance: Approaches to assessing the crack resistance of side frames of freight car bogies are proposed, allowing more accurate prediction of the possibility of crack formation in cast elements of the bogie during operation. Individual research results are used in developing new side frames for bogies with an axle load of 25 t/axle.

Keywords: bogie, side frame, crack, fracture mechanics, stress intensity factor.

For citation: Tsyganskaya, L. V. Assessment of crack resistance of side frames of freight car bogies during design / L. V. Tsyganskaya, V. A. Chernov, D. G. Bein // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 211–218. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_1_211.

Сведения об авторах

Цыганская Людмила Валериевна

Акционерное общество «Научно-внедренческий центр “Вагоны”» (АО «НВЦ “Вагоны”»),
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
заместитель генерального директора – главный конструктор НИБ,
e-mail: lyudmila.cyganskaya@nvc-vagon.ru

Чернов Владимир Александрович

Акционерное общество «Научно-внедренческий центр “Вагоны”» (АО «НВЦ “Вагоны”»),
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
исполнительный директор, доцент,
e-mail: vladimir.chernov@nvc-vagon.ru

Бейн Дмитрий Григорьевич

Акционерное общество «Научно-внедренческий центр “Вагоны”» (АО «НВЦ “Вагоны”»),
Научно-исследовательское бюро (НИБ),
кандидат технических наук, заместитель главного конструктора НИБ, действительный член Российской академии транспорта,
e-mail: dgbain@mail.ru; dmitry.bein@nvc-vagon.ru

Information about the authors

Tsyganskaya Lyudmila Valerievna

Joint-Stock Company "Scientific and Implementation Center "Vagony" (JSC "SIC "Vagony"),
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS),
Chair “Wagons and Wagon Facilities”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Deputy General Director – Chief Designer of NIB,
e-mail: lyudmila.cyganskaya@nvc-vagon.ru

Chernov Vladimir Alexandrovich

Joint-Stock Company "Scientific and Implementation Center "Vagony" (JSC "SIC "Vagony"),
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS),
Chair “Wagons and Wagon Facilities”,
Executive Director,
Associate Professor,
e-mail: vladimir.chernov@nvc-vagon.ru

Bein Dmitry Grigorievich

Joint-Stock Company "Scientific and Implementation Center "Vagony" (JSC "SIC "Vagony"),
Scientific Research Bureau (NIB),
Candidate of Engineering Sciences,
Deputy Chief Designer of NIB,
Full Member of the Russian Academy of Transport,
e-mail: dgbain@mail.ru