

УДК 620.191.3:629.46-2

## Исследование циклической трещиностойкости стали литых несущих деталей грузовых вагонов

Д. В. Даниленко<sup>1</sup>, В. П. Ефимов<sup>2</sup>, В. А. Чернов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО «УК РМ РЕЙЛ», Российская Федерация, 430006, Саранск, ул. Лодыгина, 11

<sup>2</sup>ООО «УИЦ — Вагоны», Российская Федерация, 622007, Нижний Тагил, ул. Орджоникидзе, д. 22, кв. 28

<sup>3</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Даниленко Д. В., Ефимов В. П., Чернов В. А. Исследование циклической трещиностойкости стали литых несущих деталей грузовых вагонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 60–69. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-60-69

### Аннотация

**Цель:** Проведение комплексных экспериментальных исследований циклической трещиностойкости литой стали, которая применяется для несущих деталей ходовых систем грузовых вагонов, с построением кинетической диаграммы усталостного разрушения. **Методы:** Применен метод механических испытаний образцов литой стали в условиях циклического нагружения, который позволяет получить количественные оценки способности материала сопротивляться усталостному разрушению на стадии развития усталостной трещины (испытания на циклическую трещиностойкость). Для исследования поверхности усталостного разрушения применен микрографический анализ рельефа. Для исследования элементного состава литой стали и механизмов развития усталостных трещин применен микрорентгеноспектральный анализ на различных стадиях усталостного разрушения. **Результаты:** Приведены результаты исследований циклической трещиностойкости литой стали 20ГЛ, которая применяется для несущих деталей грузовых вагонов. Построена кинетическая диаграмма усталостного разрушения, проведен детальный микрографический анализ поверхности усталостного разрушения и исследования элементного состава неметаллических включений. **Практическая значимость:** По результатам исследований можно проводить оценку работоспособности стали 20ГЛ с трещиной и прогнозировать живучесть. Полученные результаты позволяют совершенствовать методы ресурсного проектирования литых несущих деталей ходовых систем грузовых вагонов с целью повышения их эксплуатационной надежности. Результаты исследований используются предприятиями — изготовителями литых деталей для контроля стабильности технологии и повышения качества продукции.

**Ключевые слова:** Циклическая трещиностойкость, литые несущие детали, тележка грузового вагона, живучесть, микрорентгеноспектральный анализ литой стали, скорость роста усталостной трещины.

Литые несущие детали грузовых железнодорожных вагонов, изготавливаемые из стали 20ГЛ, по ГОСТ 32400—2013 [1], работают при высокой нагруженности и в различных климатических условиях. Такие детали, как боковая рама, надрессорная балка, корпус автосцепки и другие, должны обладать комплексом свойств, обеспе-

чивающих регламентированные значения сопротивления усталости и хрупкому разрушению металла, из которых они изготовлены, на протяжении назначенного срока службы. Вопросы повышения надежности литых несущих деталей грузовых вагонов становятся все более актуальными в связи с развитием в РФ тяжеловесного

движения [2] и внедрением инновационных вагонов [3]. Необходимы более углубленные исследования усталостной прочности и живучести, ответственных за безопасность движения деталей. Для литых несущих деталей новых конструкций тележек разрабатываются новые требования к их надежности [4] и новые расчетные методы их ресурсного проектирования с учетом зон повышенной ответственности [5].

Экспериментальные исследования усталостной живучести литых сталей и натуральных деталей проводятся различными организациями [6–8]. На базе этих исследований создан и постоянно пополняется банк данных по характеристикам сопротивления развитию усталостных трещин литых сталей. Однако проблема повышения усталостной прочности и живучести литых несущих деталей грузовых тележек становится все более актуальной в связи с разработкой и запуском в эксплуатацию инновационных тележек с нагрузкой на ось 25–27 тс [9, 10] и значительным повышением требований к их эксплуатационной надежности.

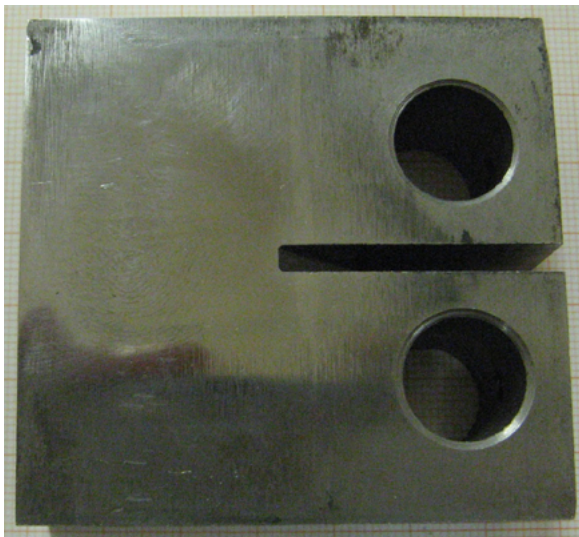
Известно, что процесс усталостного разрушения подразделяется на две основные стадии: стадию зарождения и стадию распространения усталостной трещины. Способность материала конструкции эффективно сопротивляться развитию трещины является одним из важнейших факторов, определяющим живучесть конструкции. Наличие конструктивных концентраторов, структурных дефектов литой стали, различного типа включений, реализация сложного напряженного состояния в локальных зонах конструкции деталей способствуют более раннему зарождению трещин усталости и, соответственно, ускоренному разрушению материала литых несущих деталей.

Механические испытания образцов в условиях циклического нагружения позволяют получить количественные оценки способности материала сопротивляться усталостному разрушению на

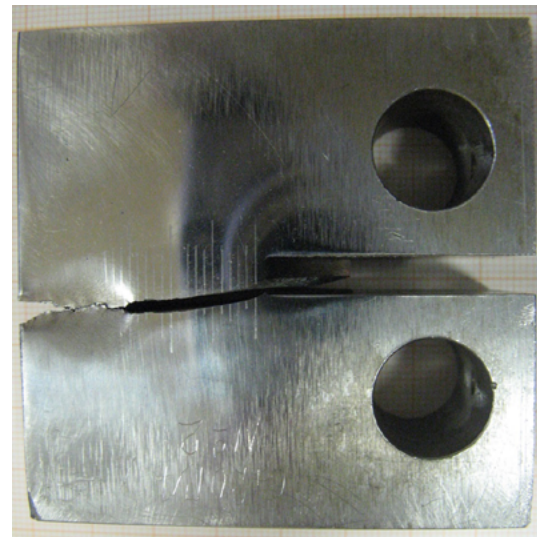
стадии распространения усталостной трещины (испытания на циклическую трещиностойкость). Основным показателем, наглядно иллюстрирующим эту способность, является кинетическая диаграмма усталостного разрушения.

Цель испытаний на циклическую трещиностойкость образцов из стали 20ГЛ — построение кинетической диаграммы усталостного разрушения. В качестве материала для исследования использовали сталь 20ГЛ, из которой изготавливаются боковые рамы тележек грузовых вагонов. Циклические испытания проводили на универсальной сервогидравлической машине фирмы «Инстрон» при комнатной температуре в условиях знакоположительного циклического растяжения с частотой изменения нагрузки  $f = 10\text{--}20$  Гц. Коэффициент асимметрии цикла нагрузки составлял  $R = 0,1$ . Испытания проводили на прямоугольных образцах с односторонним надрезом (образцы на внецентренное растяжение «ВР») (рис. 1). Габаритные размеры образцов:  $62,5 \times 60 \times 25$  мм. Методика проведения испытаний на циклическую трещиностойкость соответствовала требованиям методических рекомендаций РД 50-345—82 [11]. Анализ развития усталостной трещины (УТ) в образце данного типа и с данным вариантом надреза показал, что траектория роста УТ незначительно отклоняется от условия перпендикулярности по отношению к линии действия внешней циклической нагрузки (рис. 2). В диапазоне экспериментально полученных значений скоростей роста трещины  $\Delta v \approx 6 \cdot 10^{-8} \text{—} 1,5 \cdot 10^{-6}$  м/цикл развитие УТ характеризуется формированием все время возрастающей в размерах по мере увеличения длины трещины локальной пластической зоны в ее вершине.

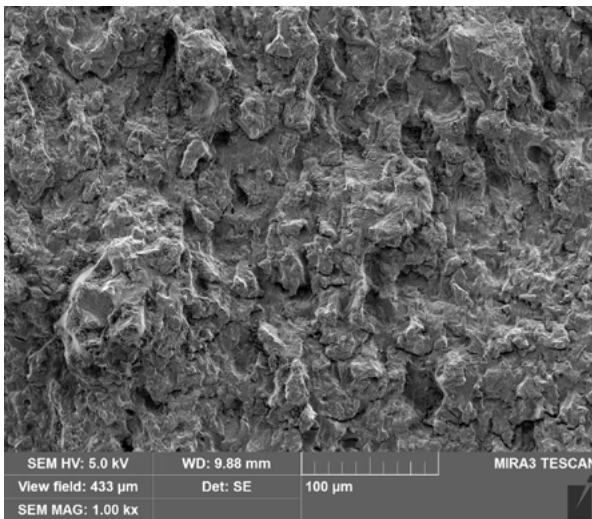
При достижении стадии ускоренного роста УТ размер локальной пластической зоны существенно возрастает (рис. 2), вызывая образование так называемого пластического шарнира, границы которого выходят на торцевую поверхность



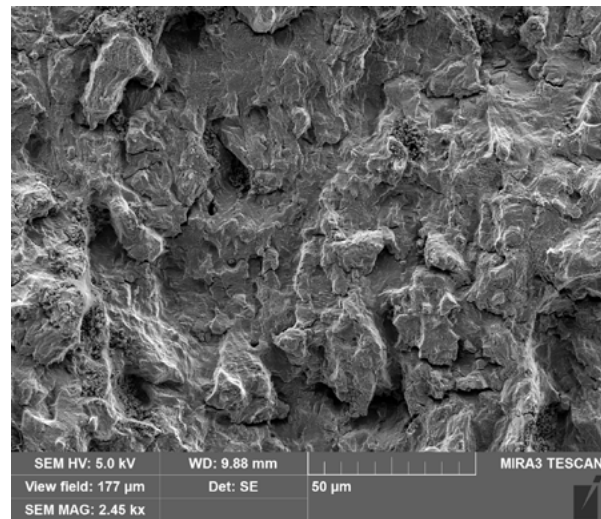
**Рис. 1.** Прямоугольный образец с односторонним боковым надрезом (образец ВР) для испытаний на циклическую трещиностойкость (скорость роста усталостной трещины)



**Рис. 2.** Образец ВР с усталостной трещиной на боковой поверхности после окончательного разрушения



*a*

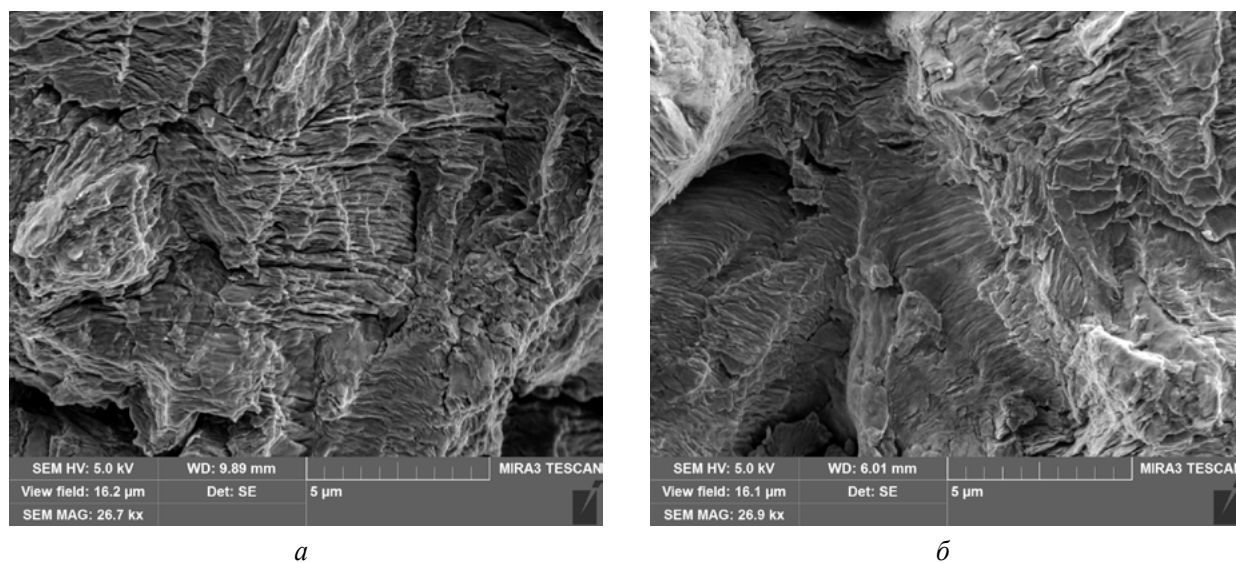


*б*

**Рис. 3.** Микрорельеф поверхности усталостного разрушения при скоростях роста УТ  $v = (0,6 : 1,0) \cdot 10^{-7}$  м/цикл: *a* —  $\times 1000$ ; *б* —  $\times 2450$

образца при достижении предельного состояния, связанного с реализацией пластической неустойчивости процесса усталостного разрушения в процессе роста трещины. Анализ макрорельефа поверхности усталостного разрушения образца ВР показывает три характерные области: стабильного, ускоренного роста УТ и зона долома. На поверхности усталостного разрушения испы-

танных образцов ВР отчетливо выявляются две основные характерные области: развития усталостной трещины (относительно ровная поверхность с незначительной шероховатостью) и статического долома (поверхность с развитым, грубым, сильно шероховатым рельефом и отчетливо выявляемым утонением материала образца на боковых поверхностях в поперечном направлении).



**Рис. 4.** Поперечные бороздки на поверхности усталостного разрушения, характеризующие рост УТ в литых сталях: *а* —  $\times 26700$ ; *б* —  $\times 26900$

В свою очередь, область развития УТ разделяется на две стадии: стабильного и ускоренного роста УТ. В изломе различие между этими стадиями выражается в увеличении шероховатости поверхности усталостного разрушения при приближении к области статического долома. Более детальный, микрофрактографический, анализ рельефа поверхности усталостного разрушения показывает, что при низких скоростях роста УТ (в начальной стадии стабильного роста УТ) формируется относительно грубый микрорельеф (рис. 3), характерный для литых сталей, на котором при больших увеличениях можно видеть наличие различного типа поперечных бороздок (рис. 4). Бороздчатый рельеф с поперечными трещинами свойственен участкам, на которых разрушение происходит по элементам литой структуры (рис. 4, *а*).

На участках, где видны относительно равномерные упорядоченные бороздки (рис. 4, *б*), рост трещины происходит по механизму образования одной бороздки за цикл нагружения, т. е., определив расстояние между соседними бороздками, можно приблизительно рассчитать скорость роста усталостной трещины. Такое сочетание различного типа бороздок свидетельствует о неравномерном подрастании трещины вдоль ее

фронта. Ближе к концу стабильного роста УТ (диапазон скоростей  $v = (4,0 : 6,0) \cdot 10^{-7}$  м/цикл) на поверхности разрушения появляются участки, содержащие скопления неметаллических включений, сферической формы, размер которых находится в диапазоне 1–2 мкм (рис. 5).

Микрорентгеноспектральный анализ (рис. 6) показывает, что основными составляющими этих включений являются алюминий, кислород, марганец и сера. Можно предположить, что это либо оксиды алюминия, либо сложные включения, состоящие из оксида алюминия и сульфида марганца.

На стадии ускоренного роста УТ можно наблюдать формирование фрагментированной блочной структуры с туннельным эффектом продвижения трещины (рис. 7).

Отчетливо видны как усталостные бороздки, так и многочисленные поперечные вторичные трещины, образование которых связано с развитой зоной локальной пластической деформации в вершине трещины, компоненты напряженного состояния (главные растягивающие напряжения) в которой имеют относительно высокие значения. Разрушение литой стали в зоне долома происходит в основном путем реализации вязких механизмов разрушения (рис. 8), ведущим из которых

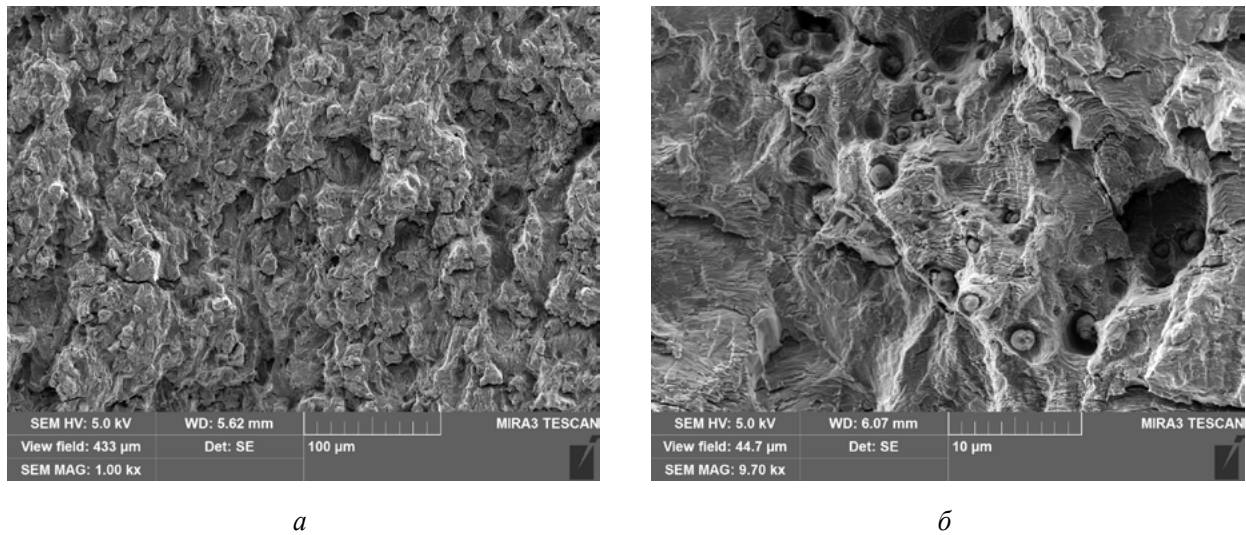


Рис. 5. Микрорельеф поверхности усталостного разрушения при скоростях роста УТ  $v = (4,0 : 6,0) \cdot 10^{-7}$  м/цикл: а —  $\times 1000$ ; б —  $\times 9700$

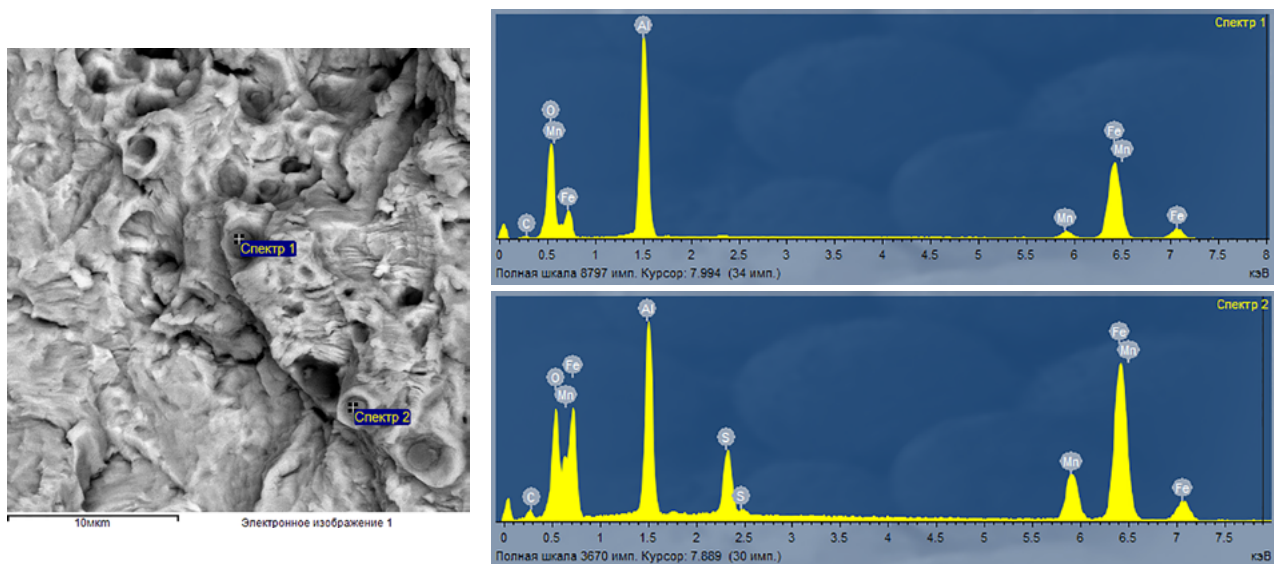
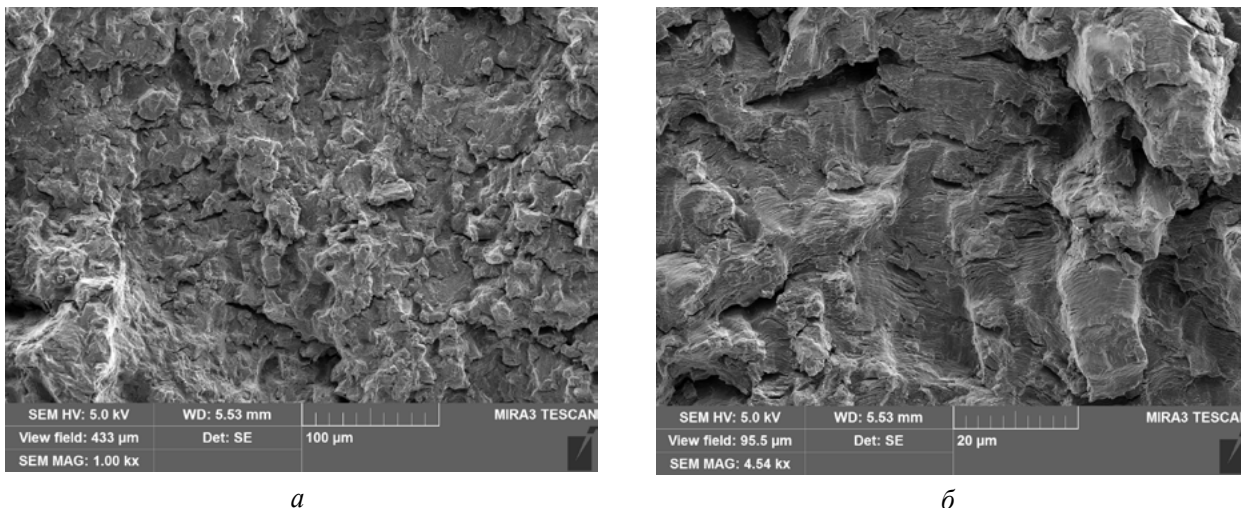


Рис. 6. Неметаллические включения на поверхности усталостного разрушения и их элементный состав

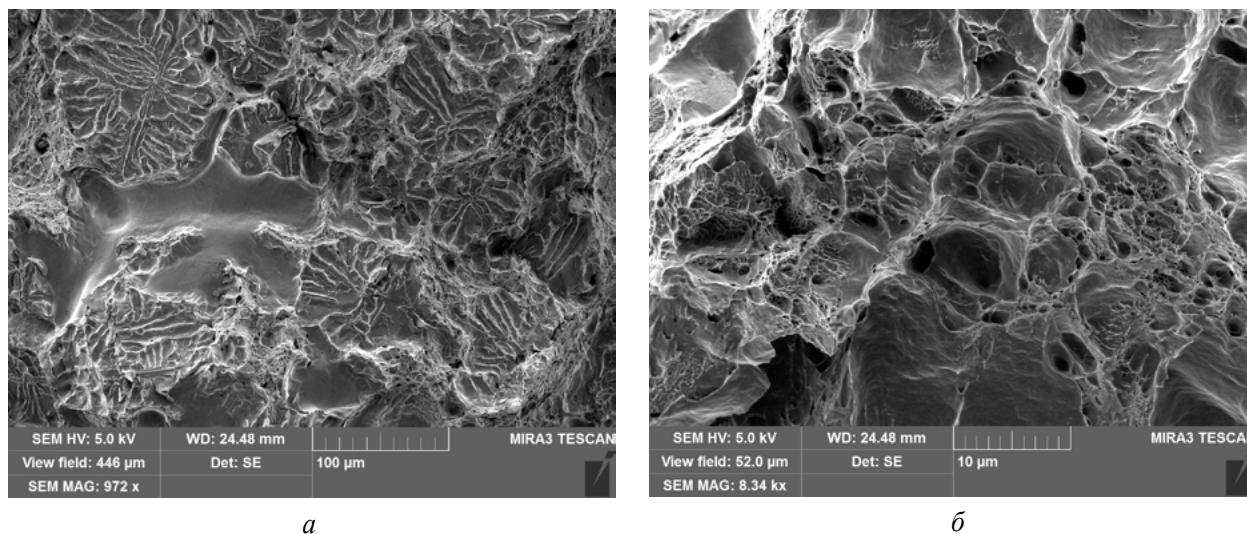
является ямочный (механизм слияния вязких ямок — рис. 8, б). Также встречаются локальные области, в которых разрушение происходит по фрагментам литой структуры, содержащей сульфидные включения (рис. 8, а).

Вязкие ямки и включения на дне ямок представлены на рис. 9, а. Сравнительный элементный анализ показал, что данные включения имеют сложный состав, состоящий из оксида алюминия и сульфида марганца (рис. 9, б).

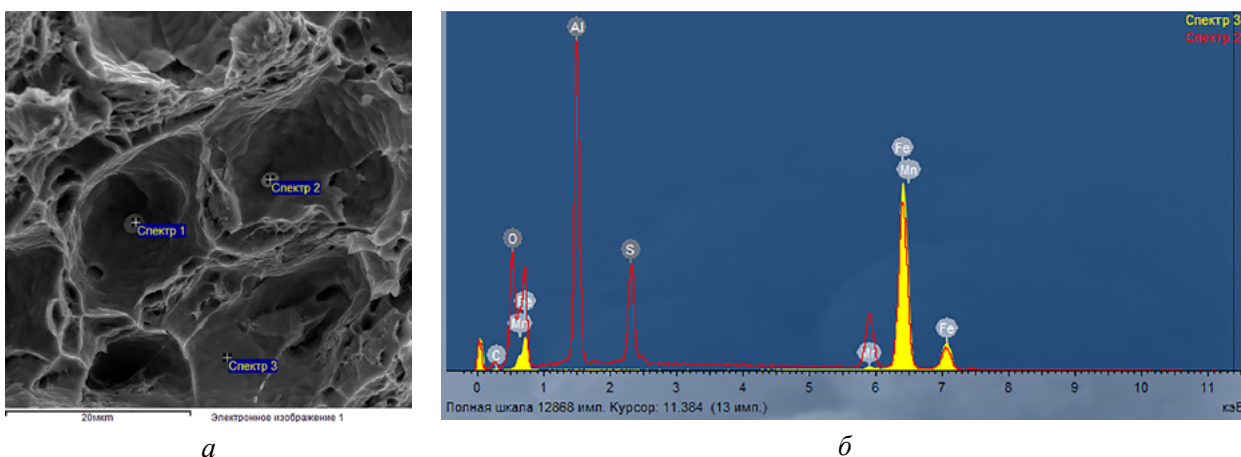
Для слежения за развитием усталостной трещины на боковых поверхностях образцов наносилились риски (рис. 2) с шагом 1 мм. На основании полученного массива данных (длина трещины ( $l_{тр}$ ) – число циклов ( $N$ )), определенного на обеих поверхностях образцов, строилась осредненная зависимость  $l_{тр} = f(N)$ . Значения скорости роста трещины получали расчетным путем, аппроксимируя полученные результаты полиномиальной зависимостью.



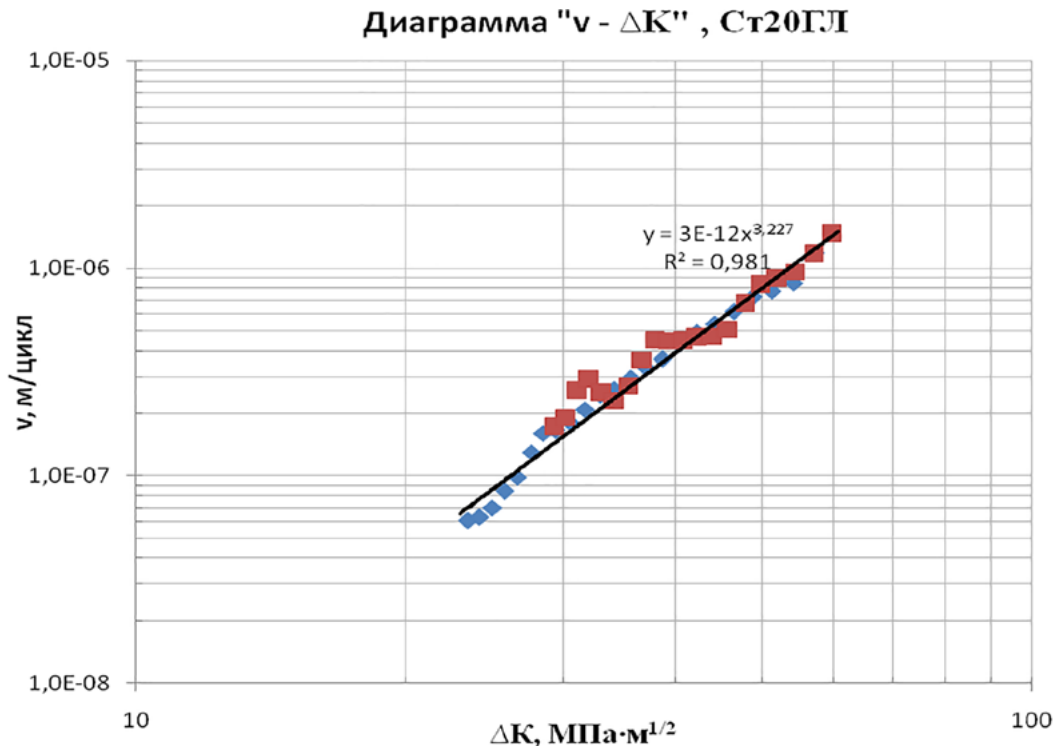
**Рис. 7.** Микрорельеф поверхности усталостного разрушения на стадии ускоренного роста УТ:  
*a* —  $\times 1000$ ; *б* —  $\times 4540$



**Рис. 8.** Микрорельеф поверхности усталостного разрушения в зоне долома:  
*a* — разрушение по фрагментам литой структуры ( $\times 972$ ); *б* — вязкий ямочный рельеф ( $\times 4540$ )



**Рис. 9.** Неметаллические включения на дне вязких ямок (*a*) и сравнительный элементный состав включений (спектр 2) и матрицы (спектр 3) (*б*)



**Рис. 10.** Кинетическая диаграмма усталостного разрушения стали 20ГЛ

Размах коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K$  определяли по формуле:

$$\Delta K = \frac{\Delta P \cdot (2 + \alpha)}{t \cdot B^{\frac{1}{2}} \cdot (1 - \alpha)^{\frac{3}{2}}} \cdot Y, \quad (1)$$

где  $Y = (0,886 + 4,64 \cdot \alpha + 13,32 \cdot \alpha^2 - 14,72 \cdot \alpha^3 + 5,6 \cdot \alpha^4)$ ;

$t$  — толщина образца;

$B$  — характерная длина;

$\alpha = l_{тр}/B$ .

На основании полученного массива данных: скорость роста усталостной трещины ( $v$ ) — размах коэффициента интенсивности напряжений ( $\Delta K$ ) строилась кинетическая диаграмма усталостного разрушения (рис. 10) в двойных логарифмических координатах  $\lg(v)$  —  $\lg(\Delta K)$ . Как было упомянуто выше, результаты циклических испытаний по определению скорости роста усталостной трещины представляют в виде кинетической диаграммы роста усталостной трещины (рис. 10). Для получения количественных оценок развития УТ необходимо полученные результаты

представить в виде соответствующей зависимости, связывающей скорость роста УТ и размах коэффициента интенсивности напряжений. Наибольшее распространение получила зависимость, предложенная Пэрисом и Эрдоганом в следующем виде:

$$v = C \left( \left[ \Delta K \right] \right)^m, \quad (2)$$

где  $C$  и  $m$  — постоянные.

Описание скорости роста УТ с помощью зависимости (2) позволяет в большинстве случаев получать корректные количественные оценки с приемлемой для практических целей точностью. Как видно из полученной диаграммы, зависимость (2) с высокой степенью точности описывает результаты эксперимента. Значения постоянных:  $C = 3 \cdot 10^{-12}$ ,  $m \approx 3,22$ .

Таким образом, с помощью зависимости (2) можно получать оценки работоспособности материала с трещиной и прогнозировать его живучесть.

**Библиографический список**

1. ГОСТ 32400—2013. Рама боковая и балка наддресорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 2013.

2. Бороненко Ю. П. Стратегические задачи вагоностроители в развитии тяжеловесного движения / Ю. П. Бороненко // Транспорт РФ. — 2013. — № 5(48). — С. 68–74.

3. Бороненко Ю. П. Выбор технико-экономических параметров и перспективы внедрения инновационных вагонов габарита Тпр / Ю. П. Бороненко // Транспорт РФ. — 2015. — № 3(58). — С. 3–6.

4. Орлова А. М. Совершенствование требований к литым боковым рамам и набрессорным балкам для повышения их надежности / А. М. Орлова, И. В. Сухих, И. В. Забадыкин // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты. Тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции. СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2013. — С. 154–157.

5. Сухих И. В. Зоны повышенной ответственности литых рам и балок трехэлементных тележек грузового вагона и их определение методом сопротивления усталости / И. В. Сухих, И. В. Забадыкин, И. В. Турутин и др. // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы X Международной научно-технической конференции. — СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. — С. 40–42.

6. Змеева В. Н. Статистические закономерности развития усталостных трещин в литых сталях деталей грузовых вагонов / В. Н. Змеева, С. Г. Лебединский // Вестник ВНИИЖТ. — 1999. — № 3. — С. 26–31.

7. Северинова Т. П. Исследование трещиностойкости сталей литых деталей тележек грузовых вагонов после

длительного периода эксплуатации / Т. П. Северинова // Вестник ВНИИЖТ. — 1999. — № 3. — С. 35–40.

8. Расщепкина Д. В. Работоспособность боковых рам тележек грузовых вагонов после возникновения опасно-го отказа / Д. В. Расщепкина, А. В. Якушев // Транспорт Урала. — 2018. — № 3(58). — С. 30–34.

9. Ефимов В. П. Тележка для грузовых вагонов нового поколения с повышенными осевыми нагрузками / В. П. Ефимов, А. А. Пранов, А. Н. Баранов и др. // Железнодорожный транспорт. — 2009. — № 6. — С. 58–61.

10. Лосев Д. Н. Опыт эксплуатации и дальнейшие пути развития технического обслуживания инновационных вагонов на тележках Barber S-2-R / Д. Н. Лосев // Транспорт РФ. — 2014. — № 3(52). — С. 24–28.

11. РД 50-345—82. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических исследований металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. Методические указания. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 95 с.

Дата поступления: 25.01.2023

Решение о публикации: 15.02.2023

**Контактная информация:**

ДАНИЛЕНКО Денис Викторович —

руководитель департамента

ЕФИМОВ Виктор Петрович —

канд. техн. наук, доц., генеральный директор;

uiz123456@mail.ru

ЧЕРНОВ Владимир Александрович —

доц. кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»

**Exploration of Cyclic Crack Resistance of Steel of Molten Load-Bearing Parts for Freight Cars**

**D. V. Danilenko<sup>1</sup>, V. P. Efimov<sup>2</sup>, V. A. Chernov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>LLC “RM RAIL Management Company”, 11, Lodygina str., Saransk, 430006, Russian Federation

<sup>2</sup>LLC “UIC — Wagons”, 22, sq. 28, Ordzhonikidze str., Nizhny Tagil, 622007, Russian Federation

<sup>3</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Danilenko D. V., Efimov V. P., Chernov V. A. Exploration of Cyclic Crack Resistance of Steel of Molten Load-Bearing Parts for Freight Cars // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 60–69. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-60-69



## Summary

**Purpose:** Carrying out complex experimental studies of cyclic crack resistance of molten steel which is used for load-bearing parts of freight wagon running systems with kinetic diagram building for fatigue failure. **Methods:** Method of mechanical testing of molten steel samples under cyclic loading conditions was applied, the method makes it possible to obtain quantitative estimates of stuff ability to resist fatigue failure on the stage of fatigue crack development (testing on cyclic crack resistance). To study the surface of fatigue failure, relief micrographic analysis was used. To study molten steel elemental composition and the mechanisms of fatigue crack development, X-ray micro-spectral analysis was used on fatigue failure various stages. **Results:** The results of the research of cyclic crack resistance of 20 ГЛJ molten steel, which is used for load-bearing parts of freight cars, are presented. Fatigue failure kinetic diagram has been built, detailed micrographic analysis of fatigue failure surface has been carried out and elemental composition of non-metallic inclusions has been studied. **Practical significance:** Based on the research results, it is possible to assess the performance of 20 ГЛJ steel with cracks and to predict survivability. The results obtained make it possible to improve the methods of resource projection of molten bearing parts for freight wagon running systems in order to increase their operational reliability. The research results are used by enterprises - manufacturers of molten parts to control technology stability and to improve product quality.

**Keywords:** Cycle fatigue crack resistance, molten bearing parts, freight car bogie, survivability, X-ray micro-spectral analysis of molten steel, fatigue crack growth rate.

## References

1. *GOST 32400—2013. Rama bokovaya i balka nadresornaya litye telezhek zheleznodorozhnykh gruzovykh vagonov. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 32400—2013. Cast side frame and bolster for bogies of railway freight cars. Specifications]. (In Russian)
2. Boronenko Yu. P. Strategicheskie zadachi vagonostroiteli v razvitiy tyazhelovesnogo dvizheniya [Strategic tasks of car builders in the development of heavy-haul traffic]. *Transport RF* [Transport of the Russian Federation]. 2013, Iss. 5(48), pp. 68–74. (In Russian)
3. Boronenko Yu. P. Vybora tekhniko-ekonomicheskikh parametrov i perspektivy vnedreniya innovatsionnykh vagonov gabarita Tpr [The choice of technical and economic parameters and the prospects for the introduction of innovative wagons of Tpr size]. *Transport RF* [Transport of the Russian Federation]. 2015, Iss. 3(58), pp. 3–6. (In Russian)
4. Orlova A. M., Sukhikh I. V., Zabadykin I. V. *Sovershenstvovanie trebovaniy k litym bokovym ramam i nabressornym balkam dlya povysheniya ikh nadezhnosti. Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty. Tezisy dokladov VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Improving the requirements for cast side frames and bolster beams to improve their reliability. Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects. Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference]. St. Petersburg: FGBOU VPO PGUPS Publ., 2013, pp. 154–157. (In Russian)
5. Sukhikh I. V., Zabadykin I. V., Turutin I. V. et al. *Zony povyshennoy otvetstvennosti litykh ram i balok trekhelementnykh telezhek gruzovogo vagona i ikh opredelenie metodom soprotivleniya ustalosti. Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty: materialy Kh Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Zones of increased responsibility of cast frames and beams of three-element freight car bogies and their determination by the fatigue resistance method. Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects: materials of the X International Scientific and Technical Conference]. St. Petersburg: FGBOU VPO PGUPS Publ., 2015, pp. 40–42. (In Russian)
6. Zmeeva V. N., Lebedinsky S. G. Statisticheskie zakonomernosti razvitiya ustalostnykh treshchin v litykh stalyakh detaley gruzovykh vagonov [Statistical patterns of development of fatigue cracks in cast steels of freight car parts]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik VNIIZhT]. 1999, Iss. 3, pp. 26–31. (In Russian)
7. Severinova T. P. Issledovanie treshchinostoykosti staley litykh detaley telezhek gruzovykh vagonov posle

dlitel'nogo perioda ekspluatatsii [Investigation of crack resistance of steels of cast parts of freight car bogies after a long period of operation]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik VNIIZhT]. 1999, Iss. 3, pp. 35–40. (In Russian)

8. Rasshchepkina D. V., Yakushev A. V. Rabotosposobnost' bokovykh ram telezhok gruzovykh vagonov posle vozniknoveniya opasnogo otkaza [Performance of side frames of freight car bogies after the occurrence of a dangerous failure]. *Transport Urala* [Transportation of the Urals]. 2018, Iss. 3(58), pp. 30–34. (In Russian)

9. Efimov V. P., Pranov A. A., Baranov A. N. et al. Bogie for new generation freight cars with increased axial loads [Bogie for freight cars of a new generation with increased axial loads]. *Zheleznodorozhny transport* [Railway transport]. 2009, Iss. 6, pp. 58–61. (In Russian)

10. Losev D. N. Opyt ekspluatatsii i dal'neyshie puti razvitiya tekhnicheskogo obsluzhivaniya innovatsionnykh vagonov na telezhkakh Barber S-2-R [Operating experience and further ways of developing the maintenance of innovative cars on Barber S-2-R bogies]. *Transport RF* [Transport of the Russian Federation]. 2014, Iss. 3(52), pp. 24–28. (In Russian)

11. RD 50-345—82. Raschety i ispytaniya na prochnost'. *Metody mekhanicheskikh issledovaniy metallov. Opredelenie kharakteristik treshchinostoykosti (vyazkosti razrusheniya) pri tsiklicheskom nagruzhении. Metodicheskie ukazaniya* [RD 50-345—82. Calculations and strength tests. Methods of mechanical research of metals. Determination of characteristics of crack resistance (fracture toughness) under cyclic loading. Guidelines]. Moscow: Izd-vo standartov Publ., 1983, 95 pp. (In Russian)

Received: January 25, 2023

Accepted: February 15, 2023

**Author's information:**

Denis V. DANILENKO — Head of the Department  
Viktor P. EFIMOV — PhD in Engineering, Associate  
Professor; uiz123456@mail.ru

Vladimir A. CHERNOV — Associate Professor,  
Department of Wagons and Wagon Industries