

О КОНТРОЛЕ СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Цель работы заключается в создании инструментального метода контроля технического состояния механических элементов экипажных частей железнодорожных локомотивов по критерию возникновения усталостных трещин в их сварных соединениях. Применялись бортовой измерительный комплекс для проведения ходовых динамико-прочностных испытаний элемента конструкции электровоза ДСЗ, компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния сварного соединения, тензометрический ноль-индикаторный метод выявления усталостных трещин.

В статье представлены результаты ходовых динамико-прочностных испытаний сварного соединения накладки гасителя буксовой ступени подвешивания с боковиной рамы тележки электровоза ДСЗ, прилученные с помощью тензометрического бортового измерительного комплекса. Установлено, что возникновение усталостной трещины в сварном соединении обусловлено дефектом катета сварного шва в месте возникновения максимальных напряжений растяжения, нештатной работой гидравлического гасителя буксовой ступени подвешивания. С помощью компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния сварного соединения без трещины, с усталостной трещиной полуэллиптической формы показана возможность ее обнаружения до достижения критических размеров в труднодоступном месте элемента конструкции с помощью созданного нами тензометрического ноль-индикаторного метода.

Сделан вывод о том, что качество ремонта сварных соединений механических элементов экипажных частей железнодорожных локомотивов может быть проверено в реальных условиях их эксплуатации без возникновения усталостного разрушения.

Мета роботи полягає у створенні інструментального методу контролю технічного стану механічних елементів екіпажних частин залізничних локомотивів за критерієм виникнення втомих тріщин в їх зварних з'єднаннях. Застосовувалися бортовий вимірювальний комплекс для проведення ходових динаміко-міцнісних випробувань елемента конструкції електровоза ДСЗ, комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану зварного з'єднання, тензометричний ноль-індикаторний метод виявлення втомих тріщин.

У статті представлені результати ходових динаміко-міцнісних випробувань зварного з'єднання накладки гасителя буксового ступеня підвішування з боковиною рами візка електровоза ДСЗ, які отримані за допомогою тензометричного бортового вимірювального комплексу. Встановлено, що виникнення втомих тріщин в зварному з'єднанні обумовлено дефектом катета зварного шва в місці виникнення максимальних напружень розтягу, нештатною роботою гасителя коливальних буксового ступеня підвішування. За допомогою комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану зварного з'єднання без тріщини, з втомною тріщиною напівеліптичної форми показана можливість її виявлення до досягнення критичних розмірів за допомогою створеного нами тензометричного ноль-індикаторного методу.

Зроблено висновок про те, що якість ремонту зварних з'єднань механічних елементів екіпажних частин залізничних локомотивів може бути перевірена в реальних умовах їх експлуатації без виникнення втомих руйнування.

The work objective is to create the tools method for controlling a technical status of the mechanical members of the vehicle parts of railway locomotives using a criterion for fatigue cracking through their welded joints. The on-board measuring complex for dynamic and structural running tests of the structural member of the DS3 electric locomotive, the computer simulation of a stressed-strained state of a welded joint, the strain-measuring null-indicator method of detection of fatigue cracks have been employed.

It is found that fatigue cracking through the welded joint results from the defect of a leg at the site of initiation of maximal tensile stresses, a supernumerary work of a hydraulic damper of the suspension axle box stage. Using the computer simulation of a stressed-strained state of the welded crack-free joint, with the fatigue crack of a semi-elliptic form, the capability of its detection prior to critical dimensions at the inaccessible site of the structural member with our strain-measuring null indicator method is demonstrated.

Conclusions about the verification of the quality of repair of welded joints of the mechanical members for the vehicle parts of railway locomotives under real operational conditions without fatigue cracking are made.

Ключевые слова: сварное соединение, усталостная трещина, ремонт, причины разрушения, компьютерное моделирование, контроль возникновения трещины.

Введение. Современные методы проектирования, изготовления рам тележек железнодорожного тягового подвижного состава предусматривают

наряду с механическими испытаниями применение компьютерного моделирования их динамики и прочности [1 – 4]. Большое внимание уделяется прочности и надежности работы сварных соединений рам тележек железнодорожных локомотивов [2]. Опыт ведения работ по ремонту, модернизации рам тележек, рам кузовов, несущих кузовов локомотивов свидетельствует о необходимости осуществления, прежде всего, контроля технического состояния их сварных соединений. В сварных соединениях малоуглеродистых, низколегированных сталей критическая глубина полуэллиптической трещины составляет 2 – 3 мм, что соответствует ее длине на поверхности 10 – 15 мм [5]. В локомотивных депо обнаружение трещин докритических размеров, особенно в труднодоступных местах, затруднено из-за небольших их размеров.

Во время эксплуатации опытной партии вновь создаваемых локомотивов или локомотивов с продленным первоначально назначенным сроком службы актуальной проблемой является создание надежных методов обнаружения в сварных соединениях элементов конструкций усталостных трещин докритических размеров. Это позволяет сократить время опытной эксплуатации локомотивов, т. к. время возникновения, развития рассеянного усталостного повреждения и возникновения магистральной трещины в пластичных конструкционных сталях составляет до 80% их долговечности [6]. При этом обеспечивается безопасность эксплуатации локомотивов, повышается точность определения эксплуатационной надежности механических элементов несущих конструкций экипажных частей.

В Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины создан тензометрический нуль-индикаторный метод обнаружения зарождения и начального роста усталостных трещин в сварных элементах конструкций транспортных машин [7].

Принцип работы тензометрического нуль-индикаторного метода обнаружения усталостных трещин заключается в непрерывном или периодическом контроле сигнала разбалансировки измерительного и компенсационного тензорезисторов тензометрических постов, установленных на контролируемой поверхности элемента конструкции. Возникновение трещины между тензорезисторами или увеличение ее размеров обуславливает появление сигнала разбалансировки исходных показаний измеренных деформаций.

В данной статье описан тензометрический метод обнаружения усталостных трещин докритических размеров в сварном соединении элемента конструкции железнодорожного локомотива.

Объект испытаний. При проведении планового ремонта электровоза ДСЗ №003, находившегося в опытной эксплуатации локомотивного депо Киев-пассажирский филиала “Юго-Западная железная дорога” ПАО “Укрзалізниця”, в боковине рамы тележки была обнаружена трещина длиной 100 мм на десять – одиннадцать часов в сварном соединении накладки крепления кронштейна гасителя колебаний буксовой ступени подвешивания (рис. 1, а). К боковине 1 рамы тележки электровоза ДСЗ с помощью сварного соединения 2 приварена накладка 3, к которой болтами крепится кронштейн 4 гасителя буксовой ступени подвешивания (рис. 1, а). Стрелками показано действие силы \vec{E} штока гасителя колебаний. Для установления причин возникновения усталостной трещины в труднодоступном для визуального контроля

месте рамы тележки, на одном из электровозов серии ДСЗ были проведены ходовые динамико-прочностные испытания этого сварного соединения.

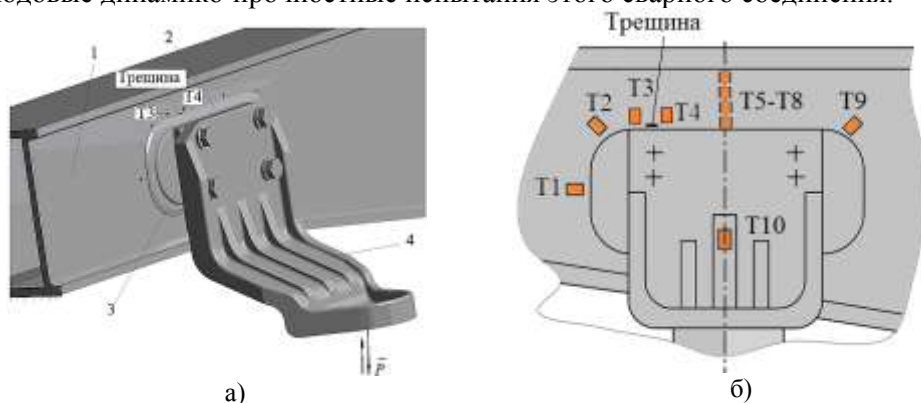


Рис. 1

На рис. 1,б показана схема размещения тензорезисторов Т1-Т10 для измерения распределения напряжений в сварном соединении во время движения локомотива. Т5 – Т8 – цепь тензорезисторов, необходимых для определения эффективного концентратора напряжений сварного соединения. На рис. 1 показано место расположения обнаруженной усталостной трещины в раме тележки электровоза ДСЗ №003. На рис. 1, а места установки тензорезисторов отмечены черными точками. Боковина рамы тележки изготовлена из стали 09Г2С ГОСТ 19903-74, накладка – из стали 20Л ГОСТ 1977-88.

В статье рассмотрен случай роботизированной сварки накладки с боковиной рамы тележки по ГОСТ 8713-79 с применением стальной проволоки (ГОСТ 2246-70). Перемещение электрода началось с места установления тензорезистора Т4 (рис. 1, б) против часовой стрелки со скоростью 20 м/час.

Измерение силы \bar{P} (рис. 2, а), действующей на кронштейн буксового гасителя колебаний во время движения локомотива, и возникающих при этом напряжений σ_a (рис. 2, б) в сварном соединении накладки с боковиной рамы тележки осуществлено с использованием измерительного комплекса БВК-6 [8] с учетом эффективного концентратора напряжений сварного соединения [9].

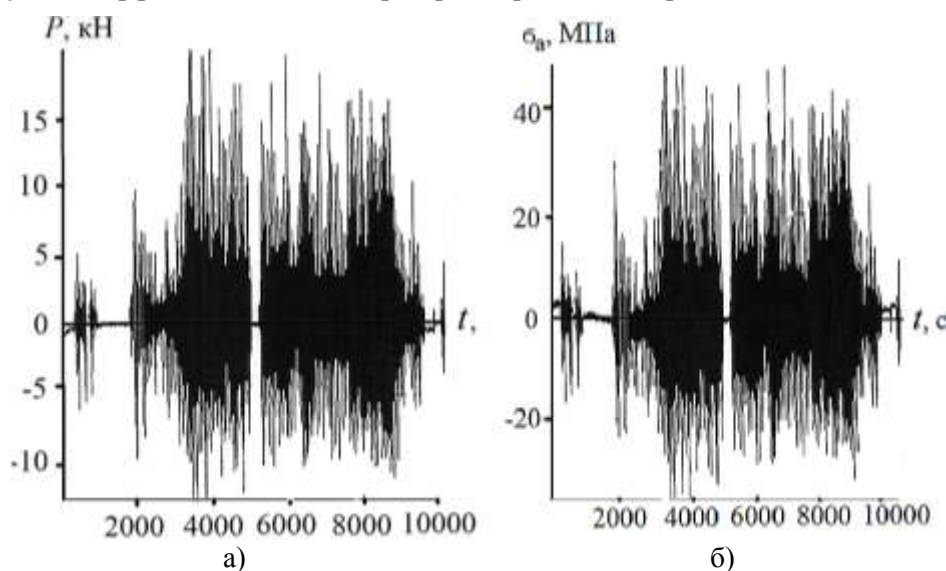


Рис. 2

Характерные фрагменты зависимостей силы \bar{E} (рис. 2, а), действующей на кронштейн буксового гасителя колебаний, и напряжений σ_a (рис. 2, б) от времени t в месте расположения тензорезистора Т4 свидетельствуют об их связи. Сила \bar{E} обуславливает возникновение напряжений в этом сварном соединении.

Значения напряжений σ_a , возникающих в сварном соединении, силы \bar{E} определены при всех условиях эксплуатации электровозов серии ДС3. Максимальное значение напряжений растяжения в месте установки Т4 составляет 50 МПа при действии на кронштейн силы величиной 17500 Н. Гармоническое изменение величины этой силы происходило в диапазоне частот 0 – 11 Гц. Ударные нагрузки не обнаружены.

Установлено, что возникновение усталостной трещины в сварном соединении обусловлено неполным наполнением катета сварного соединения в месте возникновения максимальных напряжений растяжения и нештатной работой гасителя колебаний буксовой ступени подвешивания.

Ремонт сварного соединения осуществлен путем заварки усталостной трещины в соответствии с требованиями ремонтной документации с его последующей механической проковкой по оптимальным режимам [10].

Анализ результатов измерений. Оценка возможности обнаружения усталостной трещины в отремонтированном сварном соединении тензометрическим нуль-индикаторным методом осуществлена путем компьютерного моделирования изменения его напряженно-деформированного состояния (НДС) при действии максимальной силы \bar{E} и возникновения полуэллиптической трещины. В расчетах принято, что трещины имели ширину 40 мкм с заостренными вершинами под углом 45° , сила \bar{E} направлена по стрелке вниз, как показано на рис. 1.

Расчет НДС сварного соединения (рис. 3) осуществлен методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS [11]. В расчетах учтены геометрические размеры боковины рамы тележки, накладки, катета сварного соединения и канавки, образовавшейся после механической проковки.

Учтены зависимости механических, теплофизических свойств, коэффициентов термического расширения сталей от температуры в диапазоне $1200\text{ C}^\circ - 20\text{ C}^\circ$.

Возникновение усталостной трещины 1 докритических размеров (рис. 3, а) увеличивает распределение максимальных напряжений в этом элементе конструкции (рис. 1). Здесь длина трещины равна 10 мм.

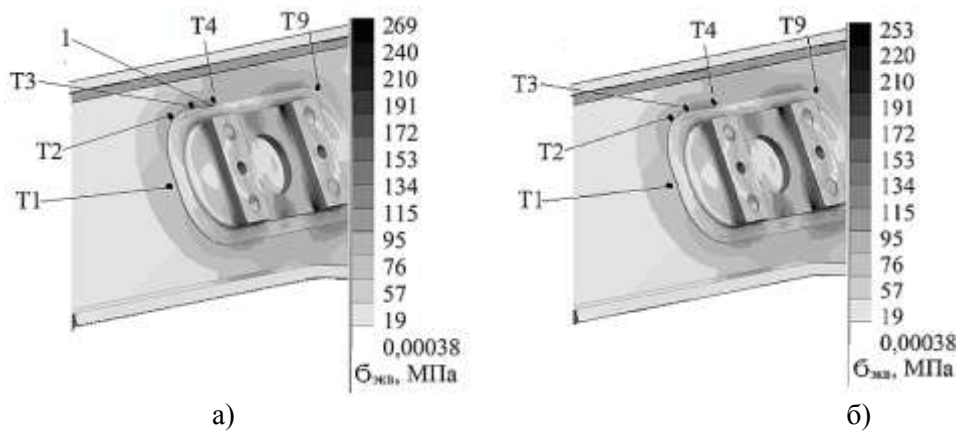


Рис. 3

Эффективные напряжения $\sigma_{\text{экв.}}$ определены по четвертой теории прочности [12] при действии максимальной силы \bar{D} .

$\sigma_{\text{экв.}} \approx \sigma_a$ в первой и второй строках табл. 1 свидетельствует о достоверности компьютерной модели расчета НДС сварного соединения.

Таблица 1

Тензорезисторы	T1	T2	T3	T4	T6	Примечание
σ_a , МПа	12,0	32,5	42,5	50,0	32,6	Экспериментальные измерения. Трещина отсутствует. Расстояние между тензорезисторами T3, T4 60 мм.
$\sigma_{\text{экв.}}$, МПа	12,1	33,5	43,2	50,2	33,3	Расчет НДС без учета остаточных термических напряжений, без трещины, без механической проковки. Расстояние между тензорезисторами T3, T4 60 мм.
$\sigma_{\text{экв.}}$, МПа	13,0	34,3	43,6	54,6	35,7	Расчет НДС с учетом остаточных термических напряжений, без трещины. Расстояние между тензорезисторами T3, T4 60 мм.
$\sigma_{\text{экв.}}$, МПа	13,5	35,3	43,6	25,6	34,7	Расчет НДС с учетом остаточных термических напряжений, механической проковки, с трещиной 10 мм. Расстояние между тензорезисторами T3, T4 60 мм.
$\sigma_{\text{экв.}}$, МПа	13,5	35,3	83,6	23,6	34,7	Расчет НДС с учетом остаточных термических напряжений, механической проковки, с трещиной 7 мм. Расстояние между тензорезисторами T3, T4 10 мм.

Изменение плотности стали 09Г2С из-за механической проковки зоны сплавления основного металла с металлом катета сварного шва учтено методом уменьшения размеров конечных элементов [13].

При отсутствии трещины в сварном соединении и действии максимальной силы \bar{E} разность значений величины $\sigma_{\text{экв}}$ в местах размещения тензорезисторов Т4 и Т3 составляет 11 МПа (третья строка табл. 1), что соответствует разности относительных деформаций в стали 09Г2С $\Delta\varepsilon = 5,24 \cdot 10^{-5}$. В случае возникновения трещины длиной 10 мм около Т4 эта разность составляет 18 МПа (четвертая строка табл. 1), что соответствует абсолютной величине $|\Delta\varepsilon| = 8,57 \cdot 10^{-5}$.

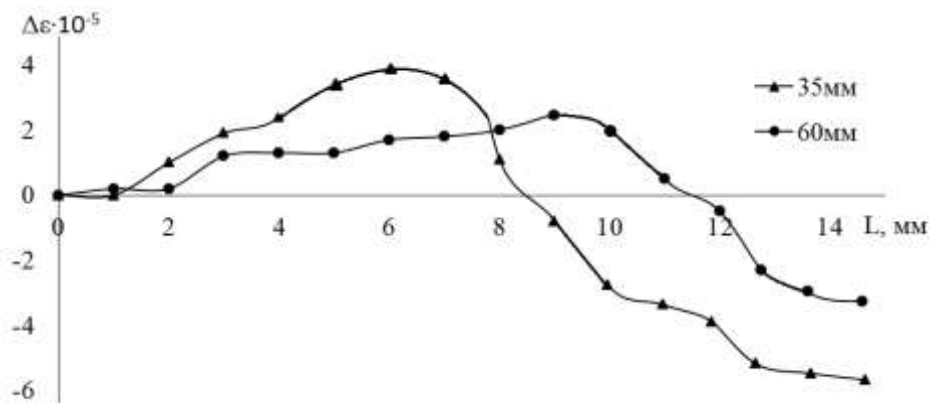


Рис. 4

Уменьшение расстояния между тензорезисторами, естественно, увеличивает сигнал рассогласования показаний этих тензорезисторов (пятая строка табл. 1). В этом случае $T4 - T3 = -60$ МПа, что соответствует абсолютной величине $|\Delta\varepsilon| = 2,86 \cdot 10^{-4}$.

В случае возникновения усталостной трещины длиной $L = 15$ мм на одинаковом расстоянии между тензорезисторами Т3, Т4 максимальные значения $|\Delta\varepsilon|$ составляют $3,5 \cdot 10^{-5}$, $6,3 \cdot 10^{-5}$ при расстоянии между тензорезисторами 60 мм, 35 мм соответственно (рис. 4). Несимметричный рост усталостной трещины обусловлен поликристаллической структурой металла конструкционной стали, сложным НДС сварного соединения.

Изменение величины $\Delta\varepsilon$ возможно измерить потому, что при использовании приборов БВК-6 [14] чувствительность тензоизмерений разности относительных деформаций равна $2,5 \cdot 10^{-5}$.

Надежная эксплуатация в течение полутора лет описанного тензометрического метода обнаружения возможного повторного возникновения усталостной трещины без возникновения разрушения отремонтированного сварного соединения боковины рамы тележки электровоза ДСЗ показала целесообразность размещения тензорезисторов с минимальным расстоянием 60 мм. Уменьшение расстояния между тензорезисторами обуславливает применение большего их количества, что уменьшает надежность работы измерительной системы в процессе длительной эксплуатации локомотива.

Увеличить чувствительность тензоизмерений обнаружения усталостной трещины возможно путем измерения разности фаз деформаций [15].

Выводы. Использование бортового измерительного комплекса БВК-6 позволяет контролировать возникновение магистральных усталостных трещин докритических размеров в отремонтированных сварных соединениях

несущих элементов конструкций железнодорожных локомотивов, что позволяет их опытно эксплуатировать без усталостных разрушений.

Применение предложенного тензометрического метода обнаружения зарождения или роста усталостных трещин в труднодоступных местах рам тележек, рам кузовов, несущих кузовов во время опытной эксплуатации тягового и моторвагонного подвижного состава позволяет автоматизировать мониторинг их технического состояния по критерию усталостной прочности.

1. *Schabert H. M.* Bench-Tests Rahmen erlebt Karren in Entwicklungsprozess / *H. M. Schabert, C. H. Moser* // *Zev. Rail. Glasers Annalen.* – 2000. – №4. – P. 291 – 296.
2. *Schmidt S.* Die Produktion von Lkw-Rahmen-Werk in Graz / *S. Schmidt* // *Zev. Rail. Glasers Annalen.* – 2001. – №3. – P. 89 – 95.
3. *Басов Г. Г.* Современные методы проектирования экипажных частей подвижного состава / *Г. Г. Басов, Н. И. Фалаев, С. И. Яцько* // *Залізничний транспорт України.* – 2004. – №4. – С. 39 – 45.
4. *Polach O.* Bogie design for better dynamic performance. Example of a locomotive bogie / *O. Polach* // *European railway review.* – 2003. – №1. – P. 69 – 74.
5. Методические указания. Надёжность в технике. Вероятностный метод расчёта на усталость сварных конструкций. РД 50-694-90. – [Действительный от 01.07.91]. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 83 с.
6. *Troshchenko V. T.* Conditions for the Transition from Nonlocalized to Localized Damage in Metals and Alloys. Part 2. Duration of Fatigue Crack Initiation and Propagation Stages / *V. T. Troshchenko, L. A. Khamaza* // *Strength of Materials.* – 2014. – Vol. 5. – P. 5 – 20.
7. *Leonets V. A.* Assessment of the null-indicator method for the detection of fatigue cracks in structural elements / *V. A. Leonets, A. O. Lukashevych, V. O. Degtyarev, L. M. Chau* // *Strength of Materials.* – 2012. – Vol.44, No 3. – P. 325 – 332.
8. *Леонец В. А.* Система динамико-прочностных испытаний несущих конструкций подвижного состава и верхнего строения пути при повышенных скоростях движения / *В. А. Леонец, О. Д. Токарев, А. А. Леонец, В. М. Куранов, П. М. Копчевский* // *Железнодорожный транспорт мира.* – 2002. – №9. – С. 73 – 76.
9. *Алексеева Л. В.* Концентрация напряжений в рамах локомотивных тележек / *Л. В. Алексеева* // *Вестн. ВНИИЖТ.* – 1969. – №7. – С. 24 – 29.
10. *Дегтярев В. А.* Деформационный критерий эффективности упрочнения сварных соединений высокочастотной механической проковкой / *В. А. Дегтярев, Б. С. Шутьгинов, В. В. Книш* // *Автомат. сварка.* – 2009. – №10. – С. 48 – 51.
11. *Kent L. Lawrence.* ANSYS workbench Tutorial Release 11 / *L. Lawrence Kent.* – Kansas : Schroff Development Corporation, 2007. – 236 p.
12. Сопrotивление материалов / *Г. С. Писаренко, В. А. Азарев, А. Л. Квитка и др.* : под ред. *Г. С. Писаренко.* – К. : Вища школа, 1973. – 671 с.
13. *Demirdogen C.* Sheet Metal Forming / Crimping Simulation in ANSYS / *C. Demirdogen, H. Oka, T. Ogut* // *International ANSYS Conference, USA, Pittsburgh.* – 2004. – 9 p.
14. *Леонец В. А.* Визначення блока напружень, що виникають у рамах візків залізничних локомотивів, з метою оцінки їх залишкового ресурсу / *В. А. Леонец, О. А. Леонец, О. Д. Токарев* // *Надійність і довговічність машин і споруд.* – 2006. – Вип. 26. – С. 282 – 286.
15. *Lukashevich A. O.* Strain-gauge method of detecting subcritical fatigue cracks in low-carbon steel welds / *A. O. Lukashevich, V. A. Leonets, L. M. Chau* // *Strength of Materials.* – 2015. – Vol. 47, No. 3. – P. 467 – 473.

Институт проблем прочности
имени Г. С. Писаренко
Национальной академии наук Украины,
Киев

Получено 17.02.2016
в окончательном варианте 28.03.2016