

Оцінка тензометричного методу виявлення втомних тріщин в елементах конструкцій

В. А. Леонець, А. О. Лукашевич, В. О. Дегтярев, Л. М. Чаус

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

Розроблено та впроваджено в дослідну експлуатацію нуль-індикаторний метод виявлення втомних тріщин у важкодоступних для візуального контролю місцях рам візків залізничних електровозів. Установлено, що чутливість методу збільшується після високочастотної механічної проковки зварних стикових з'єднань маловуглецевої сталі Ст. 3сп. Метод дозволяє виявляти зародження втомних тріщин у підповерхневих шарах сталі.

Ключові слова: інструментальний контроль втомних тріщин, нуль-індикаторний метод, прилад АВК-Т2, рама візка електровоза, зварне стикове з'єднання.

Вступ. Заварювання тріщин, що виникають у механічних елементах несівних конструкцій екіпажних частин залізничних локомотивів, проводиться в локомотивних депо або на ремонтних заводах. Такі тріщини в основному можна виявити візуально, в той час як у важкодоступних для контролю місцях зробити це неможливо.

Під час дослідної експлуатації швидкісних пасажирських електровозів українського виробництва ДСЗ в локомотивному депо станції Київ-пасажирський ДТГО "Південно-Західна залізниця" в одній з рам візків біля зварного шва приварки накладки кріплення кронштейна гасника коливачів буксового ступеня підвищування було виявлено тріщину глибиною 7 мм і довжиною 100 мм, орієнтація якої відповідає стрілці годинника на десяту годину. На заводі-виробнику цих електровозів під нашим керівництвом було проведено її заварювання відповідно до ремонтних документів Укрзалізниці та зміцнення зони сплавлення шва з основним металом шляхом високочастотної механічної проковки (ВМП) пневматичним молотком. Якість проковки контролювали по глибині утвореного рівнячка [1]. За допомогою розробленого раніше [2] нуль-індикаторного методу контролювали можливість повторного виникнення в цьому місці тріщини. Метою даної роботи є дослідження нуль-індикаторним методом можливостей виявлення зародження і початкового росту втомних тріщин в елементах конструкцій рам візків і кузовів залізничних локомотивів під час експлуатації.

Метод реєстрації появи тріщин. Принцип роботи тензометричного нуль-індикаторного методу виявлення тріщин за допомогою приладу АВК-Т2, який використовується для оперативного вимірювання статичних деформацій елементів силових конструкцій й агрегатів рухомого складу залізничного транспорту, описано в [2]. Портативний електронний блок приладу має автономне живлення, що забезпечує можливість проведення вимірювань в умовах локомотивного депо.

Нуль-індикаторний метод включає в себе періодичний контроль сигналу розбалансування вимірювального і компенсаційного тензорезисторів тензометричних постів, встановлених на елементах механічних несівних конст-

рукцій екіпажних частин локомотивів. Виникнення тріщини біля одного з тензорезисторів або збільшення її розмірів зумовлюють відповідну їх деформацію, що призводить до появи сигналу розбалансування ΔU_T приладу АВК-Т2. За величиною цього розбалансування можна виявити тріщину.

Нижче наведено результати використання приладу АВК-Т2 з поодиноким вимірювальним і компенсаційним тензорезисторами [2]. Під поняттям “поодинокій тензорезистор” будемо розуміти використання лише одного тензорезистора як чутливого елемента окремого вимірювального каналу приладу. Вимірювальні тензорезистори наклеюють у заданих контрольних точках (тензометричних постах) досліджуваного зразка або елемента конструкції ціанакриловим клеєм миттєвого твердіння і герметизують воскоподібним консервантом “Мовіль” під пиловологозахисним покриттям, придатним для тривалої експлуатації. Покриття виготовляється шляхом просочування джинсової тканини епоксидним клеєм.

Компенсаційний тензорезистор вибирають із тієї ж партії, що і вимірювальні, і наклеюють на брусок із того ж матеріалу, що і досліджувані зразки чи елемент конструкції. При випробуваннях брусок із наклеєним компенсаційним тензорезистором не деформується. Температура випробувань при цьому дорівнює температурі елемента конструкції чи зразка в місці встановлення тензорезисторів.

Під час проведення випробувань зразків у лабораторних умовах за кімнатної температури замість компенсаційного тензорезистора допускається використання резистора, величина електричного опору якого регулюється.

Диференційне увімкнення тензорезисторів забезпечує вихідне балансування вимірювального каналу тензометра незалежно від початкової деформації контрольної ділянки.

Для тензометричних постів сигнал розбалансування ΔU_T приладу АВК-Т2 визначається за формулою

$$\Delta U_T = U_{Ti} - U_{T0}, \quad (1)$$

де U_{T0} , U_{Ti} – показання приладу АВК-Т2 на моменти часу встановлення тензометричного поста T_0 і проведення контрольних вимірювань T_i .

Зародження тріщини визначається за абсолютною величиною сигналу ΔU_T , яка більша, ніж подвоєне значення відносної похибки дрейфа вимірювального каналу $\delta_{\text{АВК}}$ АВК-Т2, що працює в режимі тензометричного нуль-індикатора, і похибок δ_z , δ_k , зумовлених нестабільністю електричного опору з'єднувачів кабелів приладу з тензорезисторами та самих кабелів відповідно.

Прилад АВК-Т2 при вимірюванні деформації може експлуатуватися без попереднього градування. При цьому похибка визначається згідно з нормативною інструкцією [3] за паспортними даними робочої партії тензорезисторів підприємства-виробника. У комплекті з приладом АВК-Т2 використовують тензорезистори типу КФ5 [4]. Номенклатура метрологічних характеристик цих тензорезисторів повністю відповідає вимогам [3]. Згідно з метрологічною атестацією приладів АВК-Т2, проведеною Укрметртестстандартом, маємо $\delta_{\text{АВК}} = 3,64\%$.

Опір мідних кабелів у порівнянні з опором окремого тензорезистора (100 Ом) незначний. Тому приймається $\delta_k = 0$.

Для визначення величини δ_3 використовували установку, в якій тензорезистори типу КФ5 замінювали прецизійними резисторами MFROW4 з опором 100 Ом (відносна похибка 0,15%) і температурною компенсацією. Проводи установки з'єднували за допомогою колодки ЕТВ1602 і штирової колодки ЕТВ162401. Середньоарифметичне значення показань приладу після 50 з'єднань буде $\Delta U_{\text{сеп}} = -2,62$ мВ, його максимальне значення $-\Delta U_{\text{max}} = 0,62$ мВ.

Середньоквадратичне відхилення показань приладу $\delta_{\text{СКВ}}$ розраховували за формулою

$$\delta_{\text{СКВ}} = \frac{0,5\Delta U_{\text{max}}}{U_{\text{н}}} \cdot 100\% = \frac{0,5 \cdot 0,62 \cdot 100\%}{200} = 0,87\%, \quad (2)$$

де $U_{\text{н}}$ – нормуюче значення напружень для приладів АВК-Т2, $U_{\text{н}} = 200$ мВ.

За умови здійснення рівноточних вимірювань невиняжливих величин сигналу розбалансування приладу максимальна відносна похибка з'єднувачів кабелів приладу з тензорезисторами становить

$$\delta_{3\text{max}} = 3 \cdot 0,87\% = 2,67\%. \quad (3)$$

Загальна відносна похибка вимірювань δ буде

$$\delta = (\delta_{3\text{max}}^2 + \delta_{\text{АВК}}^2)^{1/2} = 4,51\%. \quad (4)$$

Методика контролю тріщин у зразках із маловуглецевої сталі Ст. 3сп і в рамі візка електровоза ДСЗ. Для встановлення залежності величини сигналу розбалансування приладу АВК-Т2 від довжини втомної тріщини, що виникає по лінії сплавлення шва з основним металом, проведено випробування на втому зразків із наплавленими валиками металу, які моделювали стиковий зварний шов. Результати випробування зразків із зварними швами на втому наведено в [1]. Здійснено вимірювання сигналу розбалансування приладу АВК-Т2 під час зародження та росту втомних тріщин.

Зразки зі сталі Ст. 3сп (ГОСТ 14637-89) випробовували на консольний згин на установці ДСО-2 за віднульового циклу навантаження [5]. За критерій втомного руйнування приймали довжину тріщини на поверхні зразка, яка дорівнювала ширині його робочої частини. Зразки виготовляли з листа розміром $14 \times 400 \times 40$ мм. Наплавку валиків і зміцнення зони сплавлення металу ВМП проводили на окремих зразках.

Виникаючі при цьому тріщини виявляли нуль-індикаторним методом із використанням тензорезисторів типу КФ5 із базою 1 мм. Перед наклеюванням тензорезистора його паперову основу відрізали впритул до самої решітки. Тензорезистори відрізанним кінцем наклеювали на край поверхні зразка безпосередньо біля валика наплавленого металу або на край рівчачка, який утворювався після обробки ВМП.

За вищеписаною технологією тензорезистори даного типу з базою 5 мм наклеювали на боковині рами візка (рис. 1). Встановлення на електровозі

тензорезисторів із більшою довжиною решітки зумовлено їх використанням при проведенні ходових динаміко-міцнісних випробувань боковини рами візка. На рис. 1 наведено фрагменти боковини рами візка електровоза ДСЗ з накладками кріплення кронштейнів гасників коливань буксового ступеня підвишування. Зона сплавлення шва з основним металом, зміцнена механічною проковкою, показана на рис. 1,а (затемнена ділянка). Таке зміцнення зварних швів близьке до ВМП [6, 7].

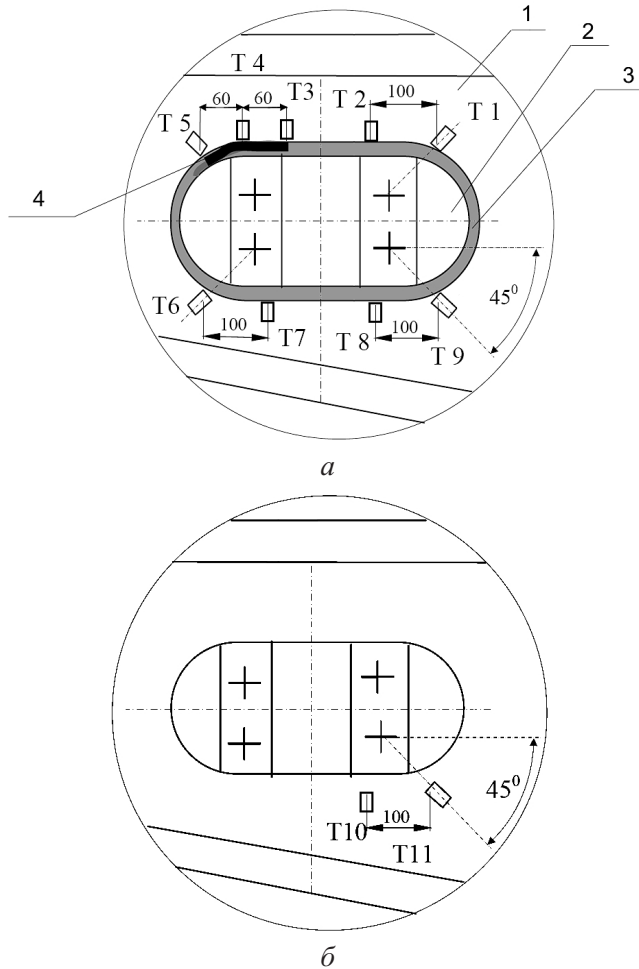


Рис. 1. Схема розміщення тензорезисторів $T1-T11$ системи контролю ділянок рами візка локомотива ДСЗ в небезпечних зонах: 1 – рама візка; 2 – перша накладка кріплення кронштейна гасника коливань буксового ступеня підвишування; 3 – зона сплавлення шва з металом, яка оброблена ВМП; 4 – зварена тріщина.

Наявність концентратора напружень на валику зварного шва приварки другої накладки до боковини рами візка зумовила встановлення тензорезисторів $T10$ і $T11$ (рис. 1,б).

Аналіз експериментальних результатів. У роботах [8–10] показано, що виникнення втомної тріщин біля зварних швів залежить, зокрема, від розподілу залишкових напружень та попереднього навантаження з різною амплітудою механічних напружень.

Нижче наведено результати досліджень нуль-індикаторним методом росту тріщин у зразках без та із залишковими напруженнями стиску, що виникають після ВМП ділянок сплавлення шва з основним металом, при блочному навантаженні. Зміцнення зварних швів ВМП проводили за оптимальної швидкості подачі інструмента 0,065 м/хв [1].

Випробування здійснювали при наростаючих значеннях амплітуд напружень σ_{ai} і різному числі циклів навантажень N . Блоки навантаження зразків наведено в таблиці.

Блоки навантаження зразків

№ зразка	σ_{ai} , МПа	N , цикл	Примітка
В10, зміцнений ВМП	$\sigma_{a1} = 375$	$1,00 \cdot 10^7$	Зруйнований після виникнення і росту тріщин із протилежних боків
	$\sigma_{a2} = 383$	$8,70 \cdot 10^5$	
	$\sigma_{a3} = 412$	$6,63 \cdot 10^5$	
В12, зміцнений ВМП	$\sigma_{a1} = 412$	$3,14 \cdot 10^5$	» »
26	$\sigma_{a1} = 211$	$1,00 \cdot 10^7$	Зруйнований після виникнення і росту однієї тріщини
	$\sigma_{a2} = 279$	$3,37 \cdot 10^6$	
	$\sigma_{a3} = 299$	$2,00 \cdot 10^6$	
	$\sigma_{a4} = 301$	$2,10 \cdot 10^5$	
	$\sigma_{a5} = 311$	$2,50 \cdot 10^6$	
41	$\sigma_{a1} = 200$	$1,00 \cdot 10^7$	Зруйнований після виникнення тріщини посередині поверхні і росту по всій ширині
	$\sigma_{a2} = 235$	$3,50 \cdot 10^5$	
	$\sigma_{a3} = 311$	$2,10 \cdot 10^5$	
46	$\sigma_{a1} = 283$	$1,03 \cdot 10^6$	Зруйнований після виникнення і росту однієї тріщини

Проведено дослідження залежності сигналів розбалансування приладу від довжини втомних тріщин у зразках до і після ВМП. На рис. 2 представлено характерні злами зразків від утомленості.

У зразках № В10, В12 виникли і росли на всю їх ширину дві тріщини (рис. 2,а,б). У зразку № 41 тріщина мала напівеліптичну форму і росла із середини робочої частини (рис. 2,в), у зразках № 26 (рис. 2,г) і № 49, злам якого не показано, – чвертьеліптичну.

Рис. 3 ілюструє залежність абсолютних значень сигналу розбалансування приладу $|\Delta U_T|$, відповідного до розміру тріщини L , від числа циклів навантажень N з напруженнями, за яких відбувалось руйнування. Значення сигналу розбалансування приладу ΔU_T під час навантаження зразка статичною силою P є від’ємними, за його відсутності – додатніми.

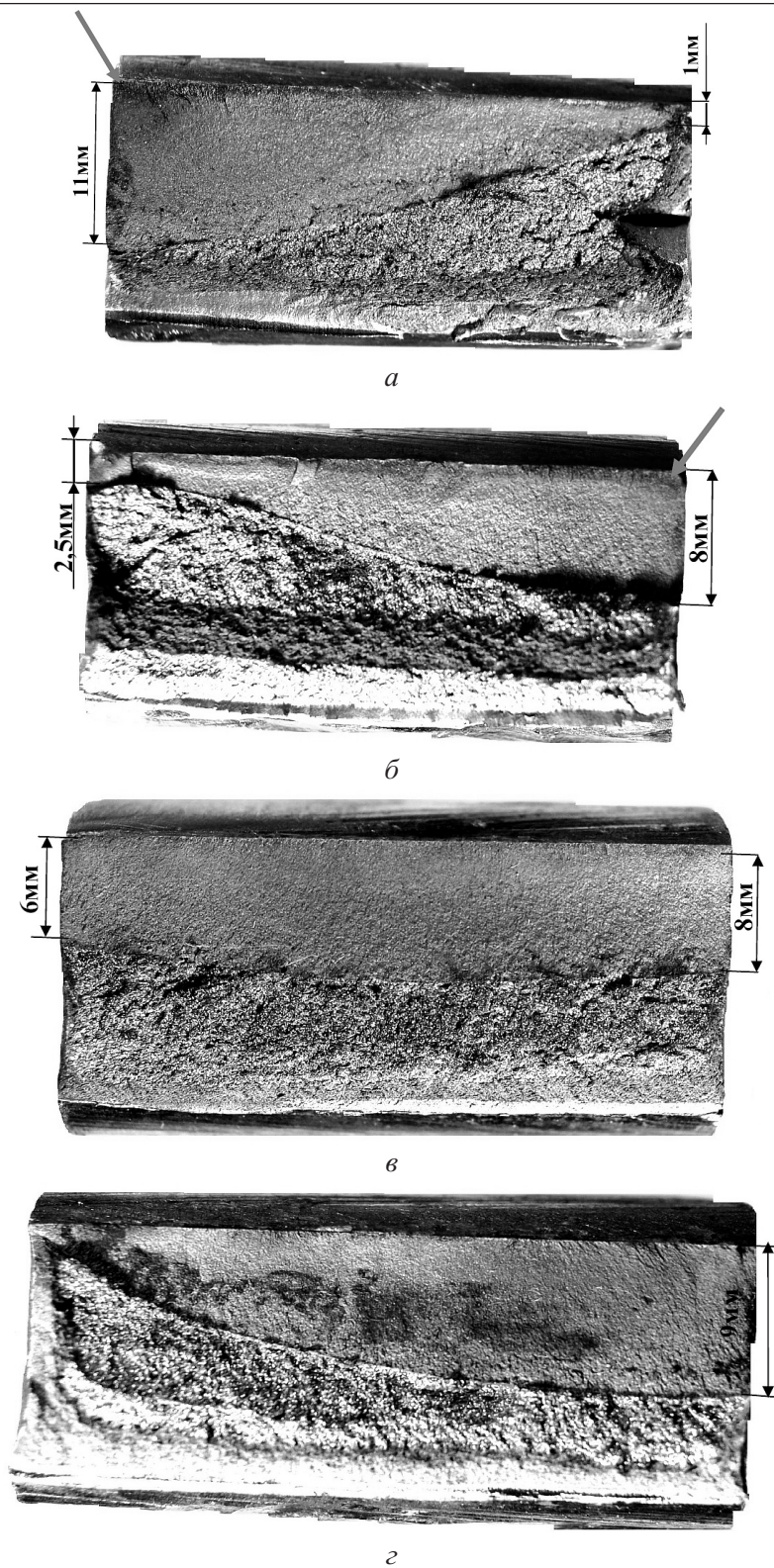


Рис. 2. Загальний вигляд зламів зразків.

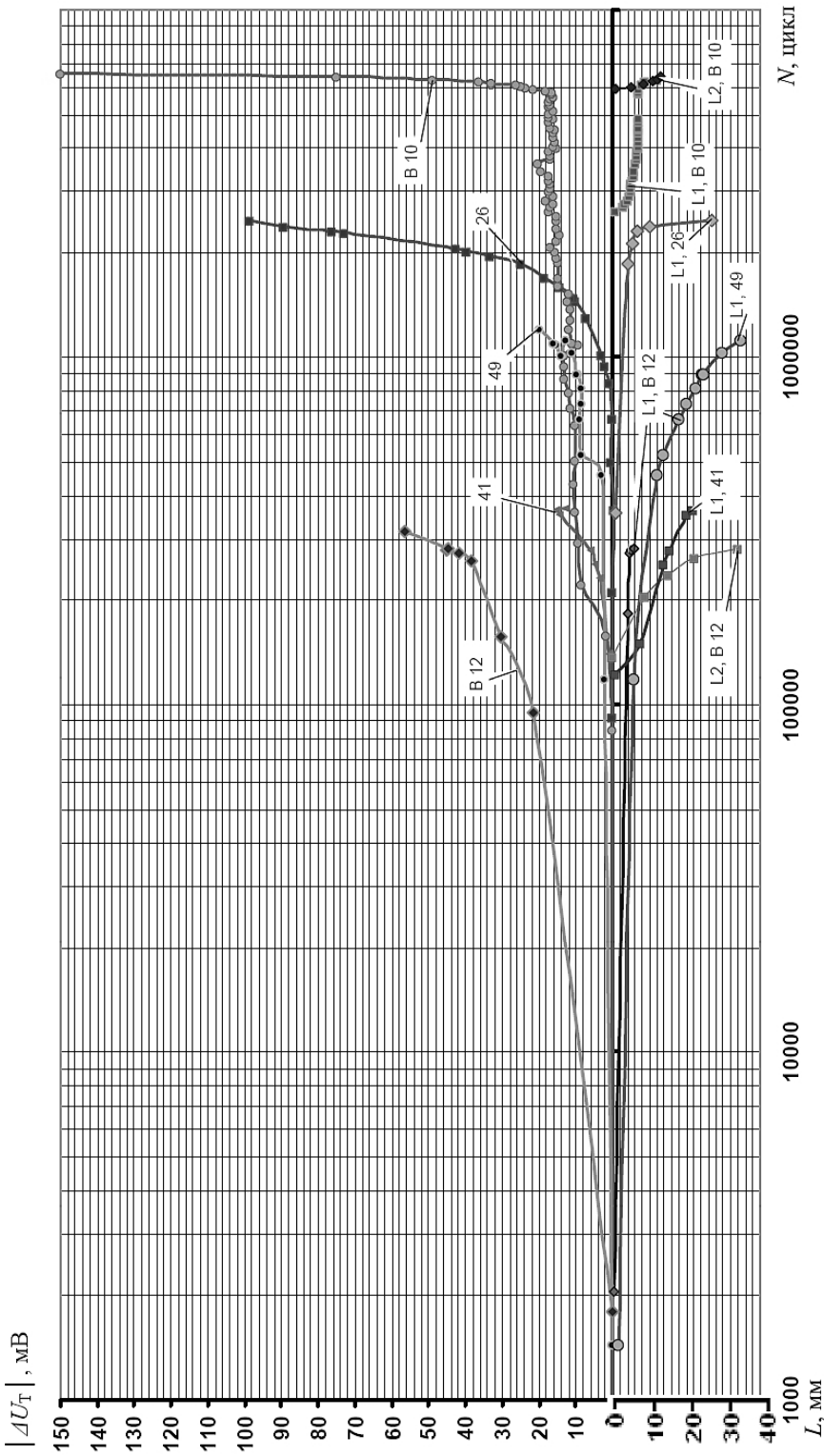


Рис. 3. Залежність сигналу розбалансування приладу $|\Delta U_T|$ та розміру тріщин L від числа циклів навантаження N (P – статична сила, з якою здійснювалось навантаження зразків під час вимірювань величини $|\Delta U_T|$; $L1, L2$ – довжина першої і другої тріщин (мм) відповідно): зразок № 41, $P = 2080$ Н; № 26, $P = 2055$ Н; № В10, $P = 2830$ Н; № В12, $P = 3130$ Н.

Зі збільшенням довжини тріщини має місце зростання сигналу розбалансування приладу. Виникнення другої тріщини зумовлює збільшення крутості графіків залежності $|\Delta U_T| - N$. При статичному навантаженні зміцнених ВМП зразків величина $|\Delta U_T|$ збільшується.

У зразку № В10 перша тріщина виникла після $2,8 \cdot 10^6$ цикл, друга – з протилежної сторони після $6 \cdot 10^6$ цикл навантаження як тільки довжина першої досягла 10 мм. Швидкість росту другої тріщини була значно більшою, ніж першої (рис. 3).

У зразку № 12 перша тріщина з'явилася після $2 \cdot 10^3$ цикл навантаження, друга – після $1,5 \cdot 10^5$ цикл. При цьому її швидкість росту також була більшою.

Зразок № 41 був зруйнований через ріст напівеліптичної тріщини, що виникла посередині його поверхні. Розповсюдження тріщини відбувалось приблизно з однією швидкістю в протилежні сторони відносно місця її зародження. У зразках № 26, 49 тріщина виникла після $2,0 \cdot 10^3$ і $1,5 \cdot 10^3$ цикл навантаження відповідно.

Нуль-індикаторним методом реєстрували тріщини незалежно від місця їх зародження і виду блоків навантаження зразків.

Особливості росту тріщин у досліджуваних зразках показано на рис. 4. У зразках, зони сплавлення шва з основним металом яких не були зміцнені ВМП, тріщини довжиною до 3 мм відповідали величинам $|\Delta U_T|$ від 1 до 3 мВ. У зразку № 41 тріщина зародилась посередині його робочої поверхні. Для тріщини довжиною 1 і 10 мм відповідно маємо $|\Delta U_T| = 1$ і 10 мВ. У зразку № 26 виникнення тріщини і різниця показань приладу АВК-Т2 були зареєстровані після $3,5 \cdot 10^5$ цикл навантаження. Для цього зразка з тріщиною довжиною 3,5 і 10 мм відповідно отримали $|\Delta U_T| = 10$ і 81 мВ. У зразку № 49 величина $|\Delta U_T| = 10$ мВ відповідала тріщині довжиною 12 мм. Максимальне значення $|\Delta U_T| = 22$ мВ отримали для тріщини довжиною 40 мм, що дорівнювало всій ширині зразка.

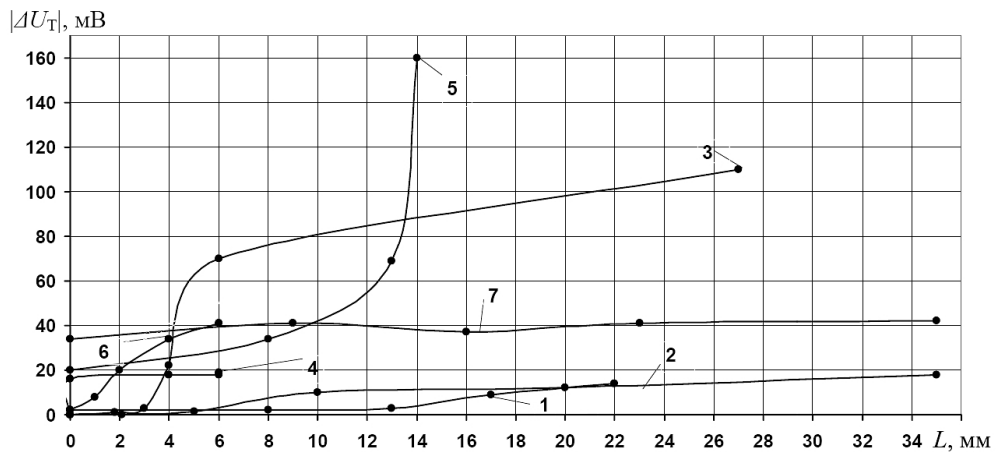


Рис. 4. Залежність сигналу розбалансування приладу $|\Delta U_T|$ від довжини тріщини L при статичному навантаженні зразків: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – зразки № 41, 49, 26, В10, В12 (L_1); В10, В12 (L_2).

У зразку № В12 зі зміцненим зварним швом зміна величини $|\Delta U_T|$ зареєстрована після $N = 1,9 \cdot 10^3$ цикл навантаження, а виникнення першої тріщини – після $N = 2,0 \cdot 10^3$ цикл. При цьому $|\Delta U_T| = 2$ мВ. Для першої тріщини довжиною 1,2 мм отримано $|\Delta U_T| = 10$ мВ. При її зростанні до 4 мм маємо $|\Delta U_T| = 33$ мВ. Зародження та ріст другої тріщини до 1 мм за довжини першої тріщини 4 мм відповідає сигналу розбалансування $|\Delta U_T| = 29$ мВ. Руйнування зразка відбулося за довжини першої тріщини 6 мм, другої – 34 мм, що відповідає $|\Delta U_T| = 42$ мВ.

У зразку № В10 зі зміцненим зварним швом у момент виникнення першої тріщини після $N = 1,9 \cdot 10^4$ цикл маємо $|\Delta U_T| = 16$ мВ. Виникнення другої тріщини після $N = 2,8 \cdot 10^6$ цикл навантаження відповідає $|\Delta U_T| = 20$ мВ. Руйнування зразка відбулося при $|\Delta U_T| = 160$ мВ.

У зразку № В12 різниця між кількістю циклів до початку зміни $|\Delta U_T|$ і виникненням тріщини становить $0,1 \cdot 10^3$ цикл, у зразку № В10 – $2,781 \cdot 10^6$ цикл.

Для зразків, які не були зміцнені ВМП, значення $|\Delta U_T| = 10$ мВ відповідає тріщинам довжиною 3,5–12,0 мм, для зміцнених зразків 0–1,2 мм.

Аналіз наведених на рис. 3, 4 даних показує, що за допомогою нуля-індикаторного методу можна реєструвати виникнення та ріст тріщин у місцях сплавлення шва з основним металом до критичних розмірів, який для чверть-еліптичних тріщин у маловуглецевих сталях становить 18 мм [11]. Чутливість методу зростає після ВМП зони сплавлення шва з основним металом. Збільшення сигналу розбалансування приладу при виникненні тріщини зумовлено в першу чергу необхідністю прикладення більших зусиль для руйнування зразка і значними залишковими напруженнями. Метод дозволяє реєструвати зміни деформації в зоні сплавлення шва з основним металом після його обробки ВМП до початку виникнення магістральної тріщини.

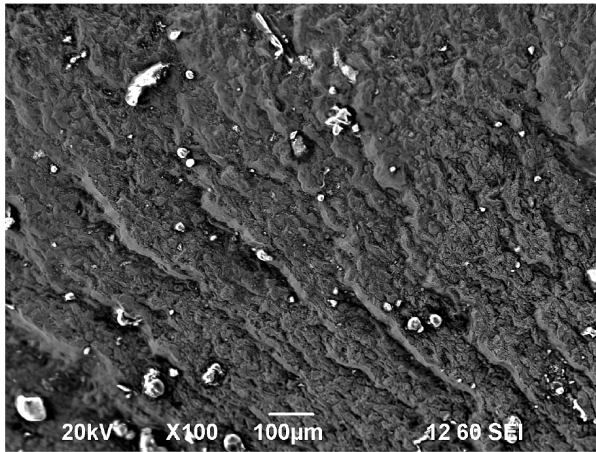
На рис. 5 представлено фотографії зламів зразків № В10, В12 в місцях, позначених стрілками на рис. 2, а, б. Фотографії отримані на растровому електронному мікроскопі JSM-6610. На зламі, показаному на рис. 5, а, наявність пагорбів у підповерхневому шарі зразка № В10 свідчить про виникнення в цих місцях вторинних тріщин. Такі тріщини мають місце у маловуглецевій сталі після пластичної деформації [12], що збільшує її довговічність. Довговічність зразків № В10, В12 становить $6,6 \cdot 10^6$ і $2,78 \cdot 10^5$ цикл навантаження відповідно. Можливо, виникнення та розвиток вторинних тріщин у підповерхневому шарі матеріалу зумовили різницю циклів навантаження зразка, за яких реєстрували зміну $|\Delta U_T|$ та виникнення макротріщини. Така особливість реєстрації тріщин, як і причина виникнення вторинних тріщин у місцях сплавлення шва з основним металом після їх обробки ВМП, вимагають додаткових досліджень.

Протягом 1,5 років проводилась дослідна експлуатація системи виявлення тріщин у боковині рами візка електровоза ДСЗ нуля-індикаторним методом. Результати вимірювань наведено на рис. 6.

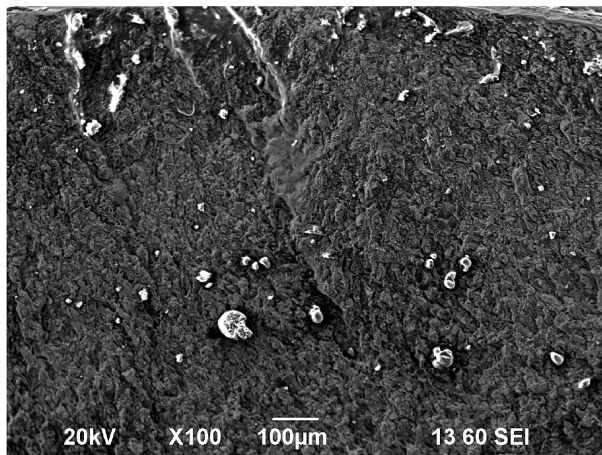
Величину розбалансування приладу ΔU_T визначали за формулою (1) за умови, що

$$\Delta U_T = U_{ij} - U_{i-1,j}, \quad (5)$$

де U_{ij} – величина падіння напруги на j -му тензорезисторі під час i - і $i-1$ -го вимірювань.



a



б

Рис. 5. Злами зразків № В10 (*a*) і В12 (*б*) в місцях виникнення чвертьеліптичних тріщин.

Під час експлуатації локомотива при проведенні вимірювань приладом АВК-Т2 у нештатному режимі зафіксовано відрив проводів від монтажних колодок п'яти тензорезисторів тензопостів № 1-2, 3-4, 4-5, 6-7, 8-9 (рис. 6). На рис. 6 штриховими лініями показано залежність ΔU_T від кількості вимірювань після ремонту системи і контролю відсутності тріщин у рамі візка після підняття кузова. Графіки побудовано з використанням комп'ютерної програми, створеної з метою контролю нуль-індикаторним методом технічного стану приписного парку локомотивів. Установлено невеликий розкид величин ΔU_T за відсутності тріщин. Це свідчить про стабільність показань приладу АВК-Т2, що достатньо для практичного його використання в умовах локомотивного депо.

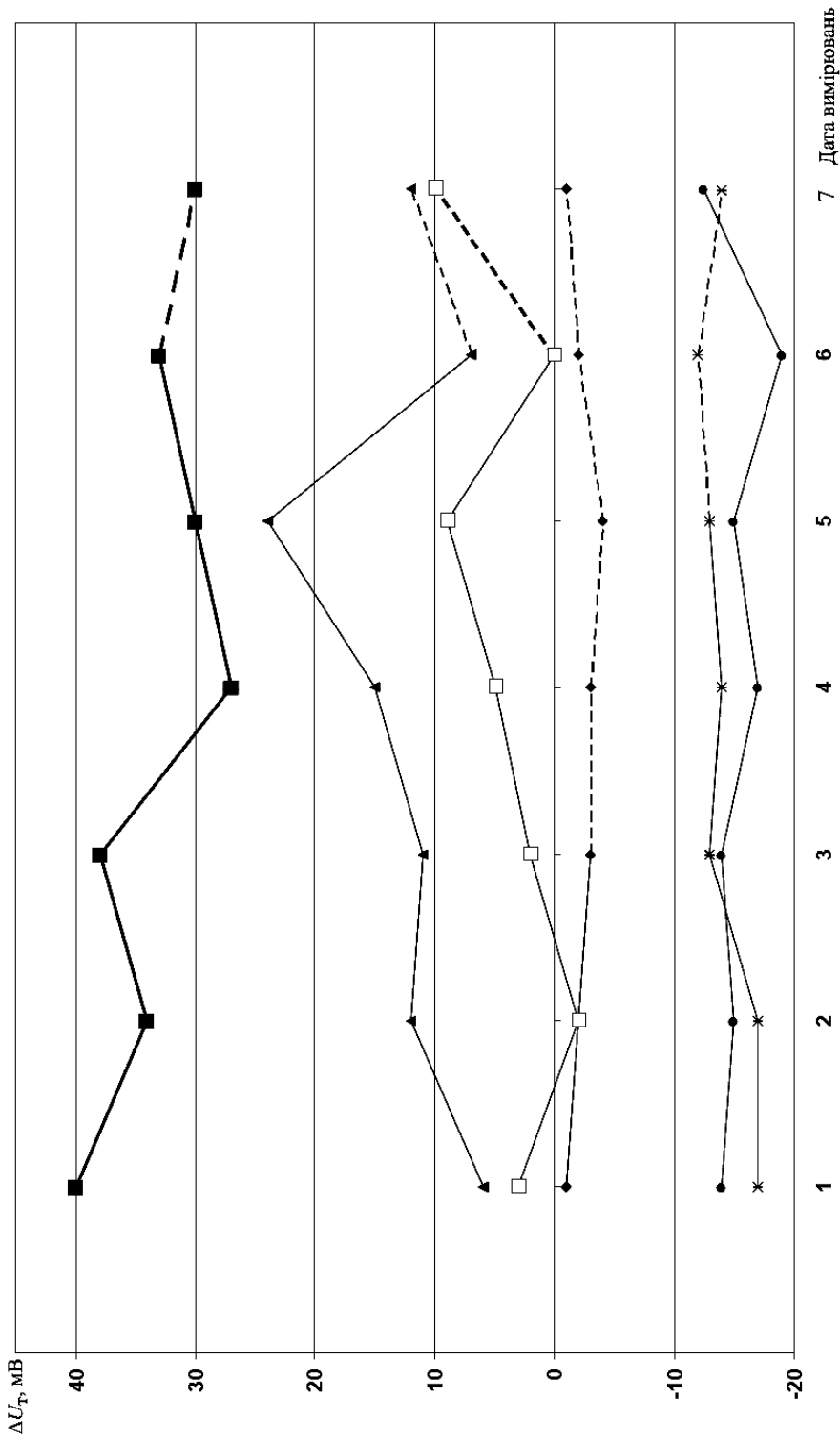


Рис. 6. Залежність сигналів розбалансування приладу АВК-Т2 $|\Delta U_T|$ від кількості вимірювань при експлуатації електровоза ДСЗ: ◆ – різниця сигналів тензорезисторів № 1, 2; ■ – № 3, 4; ▲ – № 4, 5; □ – № 6, 7; * – № 8, 9; ● – № 10, 11. (Дата вимірювань: 1 – 25.05.08; 2 – 10.05.08; 3 – 17.05.09; 4 – 26.12.08; 5 – 23.03.09; 6 – 20.03.09; 7 – 29.11.09.)

Для запобігання нештатних режимів роботи вимірювальної системи, що встановлена на рамі візка електровоза ЧС7 електровозного депо “Харків-Жовтень” СТГО “Південна залізниця”, удосконалено монтаж дротів.

Висновки

1. Вимірювання сигналу розбалансування приладу АВК-Т2 з відносною похибкою $\pm 4,5\%$ дозволяє під час експлуатації локомотива виявляти на підконтрольних ділянках елементів конструкцій втомні тріщини, розміри яких менші за критичний, в тому числі тріщини, що виникають у підповерхневому шарі матеріалу.

2. Дослідження залежностей $|\Delta U_T|$ від довжини тріщин, що виникають у зоні сплавлення стикового зварного шва з основним металом сталі Ст. Зсп (ГОСТ 14637-89), показали, що завдяки зміцненню цієї зони шляхом ВМП виявлення тріщин нуль-індикаторним методом зростає.

3. Дослідна експлуатація запропонованої системи виявлення можливих тріщин у механічних елементах несівних конструкцій залізничних локомотивів свідчить про її роботоздатність.

Резюме

Разработан и внедрен в опытную эксплуатацию нуль-индикаторный метод обнаружения усталостных трещин в тяжелодоступных для визуального контроля местах рам тележек железнодорожных локомотивов. Установлено, что его чувствительность увеличивается после высокочастотной механической проковки сварных стыковых соединений малоуглеродистой стали Ст. Зсп. Метод позволяет обнаруживать зарождение усталостных трещин в подповерхностных слоях стали.

1. Дегтярев В. А., Шульгинов Б. С., Кныш В. В. Деформационный критерий эффективности упрочнения сварных соединений высокочастотной механической проковкой // Автомат. сварка. – 2009. – № 10. – С. 48 – 51.
2. Леонец В. А., Токарев О. Д., Леонец О. А. та ін. Реєстрація появи тріщин від утомленості у важкодоступних місцях рам візків залізничних локомотивів // Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2004–2006 роках по програмі “Ресурс”. – Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 431 – 434.
3. Дайчик М. Л., Пригорювский Н. И., Хрушудов Г. К. Методы и средства натурной тензометрии. Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
4. ТУ 3.06. Украина. 7710-0001-93: Тензорезисторы КФ4 и КФ5. – Киев: Министерство машиностроения конверсии, военно-промышленного комплекса Украины, 1993. – 70 с.
5. Дегтярев В. А. Установка типа ДСО для испытаний на усталость при повторном ударном и гармоническом нагружении с различной асимметрией цикла // Пробл. прочности. – 1982. – № 10. – С. 110 – 113.

6. Кудрявцев Ю. Ф., Коршунов В. Ф., Кузьменко А. З. Повышение циклической долговечности сварных соединений ультразвуковой ударной обработкой // Автомат. сварка. – 1989. – № 7. – С. 24 – 28.
7. Лобанов Л. М., Кир'ян В. І., Книш В. В. Підвищення ресурсу зварних металоконструкцій високочастотною механічною проковкою // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – № 1. – С. 56 – 61.
8. Lierade H. P. The effect of residual stresses on the fatigue behavior of industrial parts and structures // Adv. Surf. Treat. – 1987. – 4. – P. 455 – 482.
9. Zapatero J., Moreno B., Gonzales-Herrera A., and Dominguez J. Numerical and experimental analysis of fatigue crack growth under random loading // Int. J. Fatigue. – 2005. – 27. – P. 878 – 890.
10. Lang M. and Marci G. Influence of single and multiple overloads on fatigue crack propagation // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1999. – 22. – P. 257 – 271.
11. Труфяков В. И. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках. – Киев: Наук. думка, 1990. – 256 с.
12. Гриднев В. Н., Гаврилюк В. Г., Мешков Ю. Я. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали. – Киев: Наук. думка, 1974. – 231 с.

Поступила 27. 05. 2010