

Тензометричний метод виявлення втомних тріщин докритичних розмірів у зварних з'єднаннях маловуглецевої сталі

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

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

Досліджено особливості виявлення докритичних тріщин втомленості у зварному з'єднанні маловуглецевої сталі тензометричним нуль-індикаторним методом за допомогою методик різниці амплітуд та різниці фаз. Установлено, що різке збільшення різниці амплітуд деформацій свідчить про появу в зварному з'єднанні магістральної тріщини довжиною 1 мм. Початкове збільшення різниці амплітуд деформацій скорочує час виявлення пошкодження зварного з'єднання сталі від втоми на відміну від візуальної фіксації тріщини. Використання методики різниці фаз дозволяє в десятки разів скоротити час виявлення втомного пошкодження порівняно з візуальною фіксацією тріщини.

Ключові слова: тензометричний нуль-індикаторний метод виявлення тріщин, зварне з'єднання, високочастотна механічна проковка, втомні тріщини.

Вступ. Аналіз структури зварних швів сталей показує, що причиною зниження їх опору втомі в умовах дії повторно-ударного навантаження та низької температури є різного виду дефекти, розміри яких становлять від 10 мкм і більше [1]. За їх відсутності негативного впливу ударного навантаження за низьких температур не спостерігається. Оскільки наявність дефектів різноманітної природи у зварних з'єднаннях може бути однією з причин збільшення частоти виникнення тріщин та руйнування елементів зварних конструкцій залізничних локомотивів, очевидна актуальність удосконалення методів їх виявлення.

Стадія розсіяного втомного пошкодження маловуглецевих сталей становить значну частину їх довговічності [2]. Вчасне виявлення цих пошкоджень, локальних магістральних тріщин докритичних розмірів у відремонтованих зварних з'єднаннях рам візків, рам кузовів та несівних кузовів залізничних локомотивів (НК ТРС) дозволить скоротити час їх дослідної експлуатації.

Руйнування зварних з'єднань маловуглецевих сталей, з яких виготовляються НК ТРС, відбувається при глибині напівеліптичної тріщини 2-3 мм [3], що відповідає її довжині (10–15 мм) на поверхні елемента конструкції. Під час експлуатації локомотивів візуально складно виявити такі тріщини, особливо у важкодоступних місцях НК ТРС.

Тензометричний нуль-індикаторний метод дозволяє виявляти поверхневі втомні тріщини докритичних розмірів у зварних з'єднаннях шляхом вимірювання різниці відносних деформацій (методика різниці амплітуд) [4] або різниці фаз цих деформацій (методика різниці фаз) [5, 6].

Методикою різниці амплітуд можна скористатися за наявності приладів БВК-6 [7, 8] та АВК-Т2 [9], а методикою різниці фаз – лише за наявності БВК-6.

Прилад БВК-6 можна використовувати як при проведенні ходових динаміко-міцнісних випробувань локомотива, так і при виявленні втомних тріщин докритичних розмірів в елементах конструкції.

За необхідності спостереження за технічним станом відремонтованого зварного з'єднання НК ТРС можуть здійснюватись протягом декількох років. Безперервність вимірювань приладом БВК-6 обмежена ємністю джерела його електричного живлення та об'ємом пам'яті запам'ятовуючого пристрою. Тривалий час експлуатації

бортового вимірювального комплексу, до складу якого входить прилад БВК-6, показав, що через вітрове навантаження можливе пошкодження його електричних кабелів.

При використанні приладу АВК-Т2 наведені недоліки відсутні. У цьому випадку контроль технічного стану зварних з'єднань НК ТРС здійснюється шляхом безпосереднього під'єднання приладу до тензопостів під час технічного обслуговування чи ремонту локомотива. Діапазон вимірювання відносних деформацій приладами БВК-6 становить $\pm 1,5 \cdot 10^{-3}$, а АВК-Т2 – $\pm 2 \cdot 10^{-3}$.

Метою роботи є порівняння тензометричного методу з використанням методик різниці амплітуд та різниці фаз як між собою, так і з візуальним методом при виявленні втомних тріщин.

Об'єкт та методика досліджень. Для досліджень використовували зразки зі стиковим зварним з'єднанням із листової маловуглецевої сталі Ст. 3сп товщиною 14 мм [10]. Попередньо зварену устик пластину розрізали на зразки розміром $40 \times 400 \times 14$ мм із поперечним швом, отриманим напівавтоматичним зварюванням у середовищі вуглекислого газу. Це дозволило зменшити до мінімуму залишкові напруження в зразках. У частині зразків пришовну зону зварного шва було зміцнено за допомогою високо-частотної механічної проковки (ВМП) [10].

Можливості виявлення тензометричним методом тріщин втомленості біля зварних з'єднань маловуглецевої сталі оцінювали при порівнянні чисел циклів навантаження зразків, за яких виникали різниці амплітуд відносних деформацій їх поверхонь, виміряних приладом АВК-Т2, та різниці фаз цих деформацій, виміряних приладом БВК-6. При цьому реєструвалось число циклів, за якого візуально спостерігалось виникнення магістральної тріщини.

Випробування зразків на триточковий згин проводили на установці ДСО-2 [11] за віднулевим циклом жорсткого їх навантаження. Зразок установлювався в нерухомі опори (рис. 1) і зазнавав деформування періодично діючою силою P з частотою 20 Гц. Чвертьеліптична втомна тріщина виникала в площині xOy , збільшувалась вздовж рівчачка, що утворився після ВМП пришовної поверхні зразка. Деформації поверхні зразка вимірювали тензорезисторами $T1$ та $T2$ типу КФ5 [12] із шириною решітки 1 мм (рис. 1). На необроблених ВМП зразках тензорезистори наклеювали біля валика зварного шва.

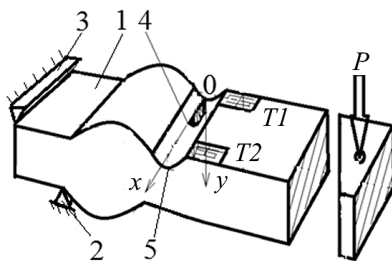


Рис. 1. Схема навантаження зразка: 1 – зразок; 2, 3 – опори; 4 – чвертьеліптична тріщина; 5 – рівчачок.

Реєстрацію виникнення втомних тріщин візуально здійснювали за допомогою мікроскопа МБС-2 з двадцятикратним збільшенням. Початкові розміри поверхневих тріщин складали від 1 до 13 мм.

Із метою порівняння можливостей методик різниці амплітуд і різниці фаз одночасно вимірювали деформації ε_{T1} і ε_{T2} поверхні зразка приладами АВК-Т2 (під час зупинки установки) та БВК-6 (при циклічному деформуванні зразка).

Прилад АВК-Т2 під'єднували до клем тензопостів тензорезисторів $T1$, $T2$ та термокомпенсаційного тензорезистора. Значення деформацій поверхні зразка відобра-

жалосся на рідкокристалічному екрані приладу. Записували деформацію при нульовому і максимальному навантаженні зразка P . Після цього продовжували його циклічне навантаження.

Різницю деформацій $\Delta\varepsilon$ поверхні зразка при $P = P_{\max}$ і $P = 0$ розраховували по формулі

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{T1}. \quad (1)$$

При постійному значенні максимальних напружень згину за багатоциклової втоми зразка збільшення величини $\Delta\varepsilon$ свідчить про виникнення у ньому втомних пошкоджень [4].

Для визначення різниці фаз деформації зразка записували осцилограми амплітуда деформації – число циклів навантаження окремо для кожного тензорезистора і вводили в ПК.

Обробку результатів вимірювань проводили за допомогою спеціальної програми в середовищі LabVIEW [13] з частотою розпізнавання інформації 4096 вимірів за секунду.

Кількість блоків N_6 , в яких розміщались інформація, розраховували по формулі

$$N_6 = N_{\text{інф}} / (N_T / 2), \quad (2)$$

де $N_{\text{інф}}$ – кількість записаної інформації в байтах; N_T – кількість вимірів в одному блоці інформації.

Після визначення кількості блоків вимірної інформації задавалась частота їх проріджування, зумовлена об'ємом оперативної пам'яті ПК. Мінімальна частота їх проріджування сягала одиниці. Експериментально встановлено, що таке проріджування можливе при об'ємі оперативної пам'яті від 3,5 Гб. Після введення в ПК інформації її обробляли за допомогою спеціальної програми і візуалізували у вигляді осцилограми на дисплеї. Для порівняння осцилограм, записаних за допомогою тензорезисторів $T1$ та $T2$, необхідно ручним способом сумістити їх за часом. Осцилограми розділялись на блоки, в кожному з яких входило по 20 чисел циклів навантажень зразка. Для кожного наступного блоку в порівнянні з попереднім розраховували фазу коливань (у радіанах). Різницю фаз $\Delta\varphi$ знаходили по формулі

$$\Delta\varphi = \varphi_{T2} - \varphi_{T1}, \quad (3)$$

де φ_{T1} , φ_{T2} – зсув фаз коливань, записаних тензорезисторами $T1$ та $T2$ відносно початку коливань відповідно.

Аналіз отриманих результатів. Результати вимірювань абсолютних величин $|\Delta\varepsilon|$ та $\Delta\varphi$ при випробуваннях на втому зразків із довговічністю $N_p = 10^5 \dots 10^6$ цикл дозволяють виявити виникнення втомних пошкоджень. Абсолютні значення $\Delta\varepsilon$ використовували для зручності порівняння результатів випробувань різних зразків.

Випробування зразків № 49 і В12 здійснювали за максимальних номінальних напружень згину $\sigma_{\max} = 283$ і 412 МПа відповідно (рис. 2). Зразок № В12 був зміцнений ВМП.

Довговічність N_p зразка № 49 складає $1,06 \cdot 10^6$ цикл. Тріщина довжиною 1,5 мм виникла після $6,63 \cdot 10^5$ цикл.

У зразку № В12 першу магістральну тріщину довжиною 3 мм виявлено візуально після $1,6 \cdot 10^5$ цикл, другу довжиною 13 мм – після $2,6 \cdot 10^5$ цикл, при цьому $N_p = 3,14 \cdot 10^5$ цикл.

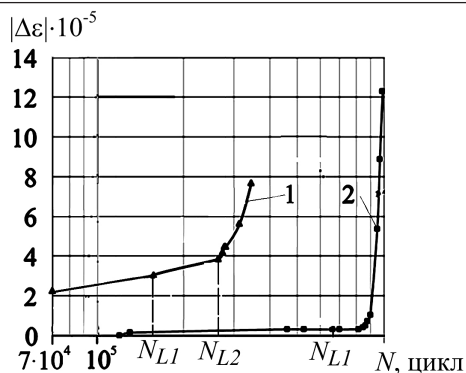


Рис. 2. Залежність абсолютного значення різниці відносних деформацій зразків $|\Delta\varepsilon|$ від числа циклів навантаження N : 1 – зразок № В12; 2 – зразок № 49. (Тут і на рис. 4: N_{L1} , N_{L2} – число циклів до візуального виявлення першої та другої тріщини.)

Різниця деформацій $|\Delta\varepsilon|$ у зразку № 49 після $1,2 \cdot 10^5$ цикл збільшується в інтервалі $0 \dots 3 \cdot 10^{-6}$. Після $8 \cdot 10^5$ цикл ця величина різко зростає.

Розміри тріщин, що виникали в результаті втомного пошкодження, та початкові розміри магістральної тріщини в маловуглецевих сталях можна виміряти лише на полірованих поверхнях зразків. У роботі [14] наведено результати досліджень переходу від розсіяного втомного пошкодження до виникнення магістральної тріщини у зразках, виготовлених із вуглецевої сталі. Основні механічні характеристики японської сталі S15C близькі до сталі Ст. 3сп (ГОСТ 14637-89) у вигляді прокату листа товщиною до 20 мм [15]: $\sigma_b = 370 \dots 480$ МПа, $\sigma_T = 245$ МПа.

В [14] також показано, що при випробуванні зразків на консольний згин при жорсткій схемі симетричного навантаження та $N_p \approx 10^6$ цикл перехід від сітки мікротріщин у магістральну тріщину довжиною 1 мм спостерігається при довговічності $(0,68 \dots 0,63)N_p$. Із врахуванням цього можна припустити, що у зразку № 49 тріщина такої довжини могла виникнути приблизно після $(7,2 \dots 8,1) \cdot 10^5$ цикл.

У зразку № 49 після $6,63 \cdot 10^5$ цикл експериментально було виявлено тріщину довжиною 1,5 мм (рис. 2). Зародження та початковий ріст магістральної тріщини супроводжуються збільшенням циклічних непружних деформацій [2] та швидкості її росту [16]. Різке збільшення величини $|\Delta\varepsilon|$ спостерігається після $8 \cdot 10^5$ цикл, що зумовлено ростом магістральної тріщини.

У зразку № В12 початкове значення $|\Delta\varepsilon| = 2 \cdot 10^{-5}$ отримано після $7 \cdot 10^4$ цикл (рис. 2), що на порядок більше порівняно з вимірним для зразка № 49. Зумовлено це збільшенням чутливості виявлення втомних пошкоджень біля зварних швів за допомогою методики різниці амплітуд у зразках, зміцнених ВМП [4]. У зразку № В12 неможливо оцінити моменти виникнення магістральних тріщин.

Під час циклічного навантаження зразка № В12 на його поверхні мало місце розсіяне втомне пошкодження у вигляді сітки тріщин. Ці тріщини ініціювали появу двох макротріщин (рис. 3,а): довжина першої магістральної тріщини збільшилась із 3 до 6 мм протягом $1,22 \cdot 10^5$ цикл, у той час як друга з початковою зареєстрованою довжиною 13 мм за цей період навантажень досягла 16 мм. Після цього довжина першої магістральної тріщини швидко збільшувалась до злиття з другою тріщиною. При цьому мало місце різке збільшення величини $|\Delta\varepsilon|$ (рис. 2).

Аналіз злому зразка № В12 (рис. 3,а) показує, що остаточне його руйнування відбулось через наявність двох чвертьеліптичних тріщин. Більша тріщина, залишкова

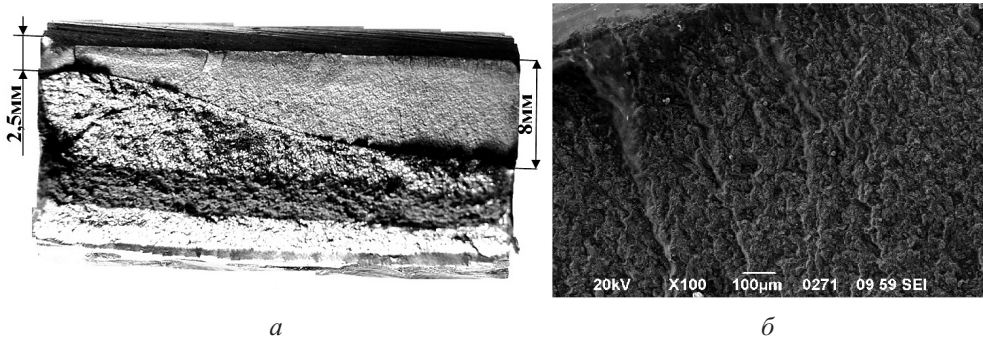


Рис. 3. Загальний вигляд злому зразка № В12 (а) та терас берега тріщини втомленості (б).

довжина якої становить 38 мм, збільшувалась під впливом характерної сітки поверхневих мікротріщин [17], про що свідчать зломи терасного типу (рис. 3,б). Менша магістральна тріщина довжиною 2 мм виникла біля концентратора механічних напружень у вигляді забоїни (рис. 3,а). Складний механізм зародження та росту цих тріщин унеможливив їх виявлення з використанням методики різниці амплітуд.

Вимірювання за допомогою методики різниці фаз $\Delta\varphi$ деформації зразка № 49 (рис. 4) можна розділити на декілька стадій згідно з [18]. Несуттєве збільшення величини $\Delta\varphi$ мало місце в інтервалі $2 \cdot 10^4 \dots 10^5$ цикл (рис. 4). Така залежність $\Delta\varphi$ від N_i характерна для маловуглецевої сталі на стадії мікротекучості [18]. При навантаженні зразка, починаючи з 10^5 цикл до виникнення магістральної тріщини, збільшення величини $\Delta\varphi$ зумовлено появою розсіяного втомного пошкодження з поступовим розвитком мікротріщин. Виникнення магістральної тріщини суттєво не вплинуло на різницю фаз $\Delta\varphi$, що корелює з результатами досліджень амплітудно-залежного розсіювання енергії в конструкційних матеріалах із тріщинами втомленості [19]. Руйнування зразка зумовило різке зменшення величини $\Delta\varphi$.

Навантаження зразка № В12 проводили в інтервалі $3 \cdot 10^3 \dots 10^4$ цикл. При цьому також спостерігалось відносно невелике збільшення $\Delta\varphi$ (рис. 4). Після 10^4 цикл збільшувалась швидкість росту $\Delta\varphi$. На рис. 4 відсутні явно виражені ознаки виникнення магістральних тріщин через складний механізм їх зародження та росту.

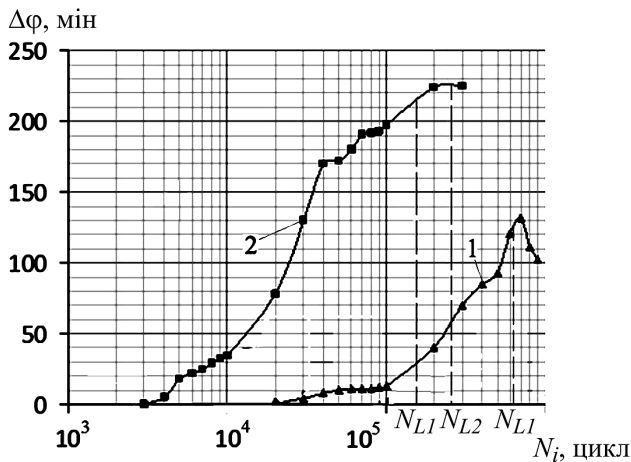


Рис. 4. Залежність різниці фаз $\Delta\varphi$ (в кутових хвилинах) від числа циклів навантаження N_i ; 1, 2 – зразки № В12 і 49 відповідно.

Результати випробувань зразків наведено в таблиці, де $N_{\text{віз}}$ – число циклів навантаження зразка при візуальному виявленні тріщини; $N_{\Delta\varepsilon}$, $N_{\Delta\varphi}$ – число циклів навантаження зразка при початковому збільшенні $|\Delta\varepsilon|$, $\Delta\varphi$ відповідно. Установлено, що за методикою різниці амплітуд можна виявити тріщину довжиною 1 мм у зразках у початковому стані шляхом реєстрації різкого збільшення величини $|\Delta\varepsilon|$.

Виявлення декількох магістральних тріщин за методикою різниці амплітуд вимагає додаткових досліджень.

Використання методики різниці амплітуд дозволяє зменшити час виявлення втомних пошкоджень у п'ять разів, а методики різниці фаз – більше ніж у 50 разів порівняно з візуальною фіксацією тріщин (таблиця).

Максимальні номінальні напруження σ_{max} та число циклів навантаження зразків N_i

№ зразка	σ_{max} , МПа	$N_{\text{віз}}$, цикл	$N_{\Delta\varepsilon}$, цикл	$N_{\Delta\varphi}$, цикл	N_p , цикл
В12, зміцнений ВМП	412	$1,6 \cdot 10^5*$	$7 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^3$	$3,14 \cdot 10^5$
		$2,6 \cdot 10^5**$	–	–	
49	283	$6,63 \cdot 10^5***$	$1,2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4$	$1,06 \cdot 10^6$

Примітка. Однією зірочкою позначено момент виникнення першої тріщини довжиною 3 мм, двома – другої тріщини довжиною 13 мм, трьома – третьої тріщини довжиною 1,5 мм.

Враховуючи, що різниця фаз є амплітудно-залежною величиною, питання про її використання для моніторингу технічного стану елементів конструкцій транспортних машин, які працюють при нерегулярному навантаженні, – відкрите для наступних досліджень.

Висновки

1. Використання методики різниці амплітуд дозволяє виявляти у зварних з'єднаннях у початковому стані магістральні тріщини довжиною 1 мм шляхом реєстрації різкого збільшення $|\Delta\varepsilon|$. При цьому початкове збільшення $|\Delta\varepsilon|$ свідчить про появу втомних пошкоджень.

2. Для зварного з'єднання, зміцненого ВМП, указані методики дозволяють скоротити час виявлення пошкодження сталі від утоми на відміну від візуальної фіксації тріщин більше ніж у 50 разів.

3. Використання методики різниці фаз для контролю технічного стану елементів конструкцій залізничних локомотивів потребує подальших досліджень.

Автори щиро дякують канд. техн. наук В. О. Дегтярьову за цінні зауваження та рекомендації.

Резюме

Исследованы особенности выявления докритических усталостных трещин в сварном соединении малоуглеродистой стали тензометрическим нуль-индикаторным методом с помощью методик разницы амплитуд и разницы фаз. Установлено, что резкое увеличение разницы амплитуд деформаций свидетельствует о возникновении в сварном соединении магистральной трещины длиной 1 мм. Начальное увеличение разницы

амплитуд деформацій скорочує час виявлення пошкодження зварного з'єднання сталі від втоми в порівнянні з візуальною фіксацією тріщин. Використання методики різниці фаз дозволяє в десятки раз скоротити час виявлення усталостного пошкодження порівняно з візуальною фіксацією тріщин.

1. Шульгинов Б. С. О некоторых причинах снижения сопротивления усталости сталей и их сварных соединений с учетом условий эксплуатации горнодобывающей и транспортной техники в районах крайнего Севера // Прочность материалов и конструкций при низких температурах: Сб: науч. тр. – Киев: Наук. думка, 1991. – С. 248–253.
2. Троценко В. Т., Хамаза Л. А. Условия перехода от рассеянного к локализованному усталостному повреждению металлов и сплавов. Сообщ. 2. Продолжительность стадии зарождения и развития усталостных трещин // Пробл. прочности. – 2014. – № 4. – С. 5–20.
3. РД 50-694-90. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций. Методические указания. Надежность в технике. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 83 с.
4. Leonets' V. A., Lukashevich A. O., Degtyarev V. O., and Chaus L. M. Assessment of the null-indicator method for the detection of fatigue cracks in structural elements // Strength Mater. – 2012. – 44, No. 3. – P. 323–332.
5. Леонєць В. А., Лукашевич А. О., Чаус Л. М. Продовження терміну експлуатації рам візків електровозів ЧС7 // Прочність матеріалів і елементів конструкцій: Тр. міжнарод. науч.-техн. конф. “Прочність матеріалів і елементів конструкцій” (28–30 сент. 2010). – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 854–860.
6. Лукашевич А. О. Виявлення втомних тріщин в елементах конструкцій, виготовлених з маловуглецевої сталі // Вісн. Терн. нац. техн. ун-ту ім. І. Пулюя. – 2011. – Ч. 2. – С. 143–150.
7. Токарев О. Д., Леонєць В. А., Чаус Л. М. Измерительный преобразователь “одиночного” тензодатчика с компенсационным тензорезистором // Датчики и системы. – 2011. – № 5. – С. 20–24.
8. Леонєць В. А., Леонєць О. А., Токарев О. Д. Визначення блока напружень, що виникають у рамках візків залізничних локомотивів з метою оцінки їх залишкового ресурсу // Надійність і довговічність машин і споруд. – 2006. – Вип. 27. – С. 282–286.
9. Леонєць В. А., Токарев О. Д., Леонєць О. А. та ін. Реєстрація появи тріщини від утомленості у важкодоступних місцях рам візків залізничних локомотивів // Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2004–2006 рр. по програмі “Ресурс” / Під. ред. Б. Є. Патона. – Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 431–434.
10. 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.
11. 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.
12. ТУ 3.06 України 7710-0001-93. Тензорезисторы КФ4 и КФ5. – Введ. 01.01.92.
13. Трэвис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 880 с.

14. *Matake T. and Imai Y.* Heat release in fatigue tests of steel under bending, torsion and their combination (in Japanese) // *Bull. Res. Inst. Appl. Mech. (Kyushu University)*. – 1976. – **45**. – P. 31–43.
15. *Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог РФ колеи 1520 мм.* – М.: ВНИИЖТ, 1998. – 145 с.
16. *Троценко В. Т., Хамаза Л. А.* Условия перехода от рассеянного к локальному усталостному повреждению металлов и сплавов. Сообщ. 3. Определение условий перехода на основе анализа кинетики развития трещин // *Пробл. прочности*. – 2014. – № 5. – С. 5–19.
17. *Гарф М. Э., Крамаренко О. Ф., Филатов М. Я. и др.* Развитие усталостных трещин в материалах и конструкциях. – Киев: Наук. думка, 1980. – 150 с.
18. *Иванова В. С., Терентьев В. Ф.* Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 455 с.
19. *Бовсуновский А. П.* К вопросу о механизме рассеяния энергии в трещине усталости // *Пробл. прочности*. – 2002. – № 5. – С. 80–99.

Поступила 28. 10. 2014