

УДК 539.4:669.1

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ВТОМНОЇ МАКРОТРИЩИНИ ЗА ПОПЕРЕЧНОГО ЗСУВУ

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ, Т. М. ЛЕНКОВСЬКИЙ, І. А. ВЕРГУН, С. Т. ШТАЮРА

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Досліджено кінетику зсувної макротріщини за втомного руйнування поперечним зсувом термозміцненої сталі 65Г троостито-сорбітної структури за низько-, середньо- та високоамплітудних циклічних навантажень. Побудовано кінетичну діаграму втомного руйнування з врахуванням тертя берегів зсувної тріщини в діапазоні швидкостей її росту до 6 порядків. На основі побудованої графічної залежності визначено основні та додаткові характеристики циклічної тріщиностійкості. Досліджено контактну взаємодію берегів втомної тріщини та фрактографічні особливості руйнування за низько- та високоамплітудного деформування циклічним поперечним зсувом.

Ключові слова: *поперечний зсув, кінетична діаграма втомного руйнування, тертя берегів тріщини, характеристики циклічної тріщиностійкості.*

Дослідження росту втомних тріщин (РВТ) та циклічної тріщиностійкості (ЦТ) високоміцних конструкційних матеріалів за поперечного зсуву є дуже важливі [1–6]. Аналіз літературних даних [6] вказує на необхідність розроблення нових методів із використанням для опису РВТ коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) K_{II} . Для цього запропоновано [7–11] теоретико-експериментальний підхід до вивчення кінетики РВТ за поперечного зсуву та розроблено необхідний інструментарій, а саме: конструкцію зразка для дослідження ЦТ металічних матеріалів [7], установку для його циклічного навантаження [8], спосіб для визначення коефіцієнта тертя берегів тріщини (ТБТ) та методику побудови кінетичних діаграм втомного руйнування (КДВР) з визначенням характеристик ЦТ сталей [9, 11]. Досліджено [11] швидкість РВТ на середньоамплітудній ділянці КДВР термозміцненої сталі 65Г. Мета цієї роботи – встановити кінетику зсувної макротріщини за низько- та високоамплітудних циклічних навантажень, дослідити взаємодію берегів тріщини, а також мікромеханізми втомного руйнування за циклічного поперечного зсуву.

Обладнання та методика досліджень. Зразки для випробувань з розмірами $L_1 = 180,0$ mm, $H_1 = 32,0$ mm, $r = 20,0$ mm, $L = 110,2$ mm, $W = 27,0$ mm, $D = 6,0$ mm, $H = 27,8$ mm, $T = 9,6$ mm, $b_1 = 87,8$ mm, $b = 72,0$ mm, $2d = 15,9$ mm, $c = 1,4$ mm, $t = 3,2$ mm (рис. 1) виготовляли зі сталі 65Г та гартували з 820°C в оливу з відпуском за температури 500°C упродовж 1 h. Це зумовило троостито-сорбітну структуру матеріалу з механічними характеристиками $\sigma_{0,2} = 1160$ МПа, $\sigma_B = 1320$ МПа, $\delta_{10} = 10\%$, $\psi = 34\%$, які визначали згідно зі стандартом [12], після чого у зразках на нейтральній лінії наносили боковий надріз довжиною $h = 25,2$ mm та V-подібні канавки до $t_0 = 1,1$ mm. Для циклічного навантаження зразків використано установку [8] з електромеханічним приводом, яка реалізує жорстке навантаження за синусоїдним симетричним циклом (за асиметрією $R = -1$) з частотою 12 Hz.

Обчислювали КІН K_{II} в діапазоні відносних довжин втомної тріщини $0,40 \leq l/b \leq 0,55$ за отриманою методом скінченних елементів розрахунковою формулою

Контактна особа: Т. М. ЛЕНКОВСЬКИЙ, e-mail: lenkovskiy@ipm.lviv.ua

$$K_{II} = \frac{P}{t_0 \sqrt{H}} \left[0,22 + 6,29 \frac{l}{b} - f_c \left(1,2 \frac{l}{b} + 1,34 \right) \right],$$

де l – довжина втомної тріщини разом з надрізом від лінії прикладання сили; P – зусилля навантаження; b, H – довжина і висота робочої частини зразка відповідно; t_0 – товщина робочого перехийка; f_c – коефіцієнт ТБТ.

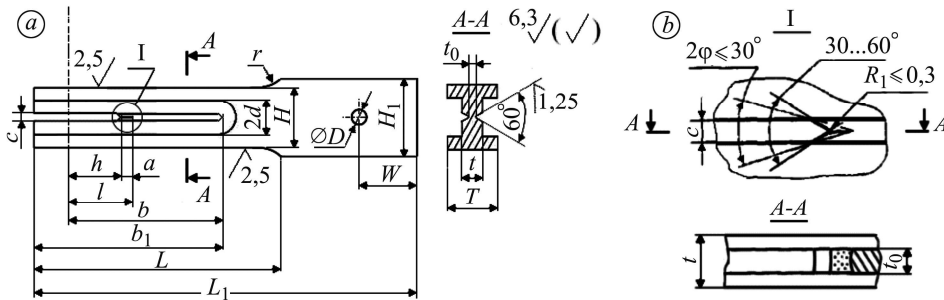


Рис. 1. Зразок для дослідження росту втомної макротріщини в металічних матеріалах за поперечного зсуву: a – загальна конструкційна схема; b – форма крайового надрізу.

Fig. 1. Specimen for investigation of fatigue macrocrack growth in metallic materials under transverse shear: a – main structural scheme; b – form the edge notch.

Коефіцієнт ТБТ f_c визначали на основі раніше запропонованого способу [9, 11], згідно з яким фрагменти зруйнованих зразків, які містять ділянки поширення втомної тріщини, випробовували як пару тертя за законом Кулона–Амонтона.

Під час випробувань задовольняли умову на обмеження максимальних зсувних напружень τ_{\max} на нейтральній лінії зразка: $\tau_{\max} \leq 0,25\sigma_{0,2}$. Згідно з розв'язком задачі [10], для визначення τ_{\max} використали формулу

$$\tau_{\max} = 1,34P / (t_0 \cdot H).$$

Початкову макротріщину у зразку абсолютної довжини $a \geq 3,6$ mm, що відповідає $l/b \geq 0,4$, утворювали реверсивним консольним згином так, що швидкість її росту не перевищувала швидкості на початку втомних випробувань. Після її утворення зусилля навантаження зразка змінювали, щоб забезпечити швидкість РВТ у межах $V = 10^{-10} \dots 10^{-4}$ m/cycle. Приріст тріщини заміряли через кожних $(5 \dots 10) \cdot 10^3$ cycles. Під час експерименту реєстрували зусилля навантаження зразка P , кількість циклів навантаження N та довжину втомної тріщини a . Швидкість поширення тріщини визначали як $V = da/dN$, де da – приріст довжини тріщини за dN циклів навантаження. Для встановлення припорогових значень КІН $K_{II \max}$ (початок низькоамплітудної ділянки КДВР) навантаження знижували доти, доки тріщина упродовж 10^6 циклів не росла. Далі навантаження поступово збільшували. Для отримання критичних значень КІН $K_{II \max}$ (кінець високоамплітудної ділянки КДВР) реєстрували навантаження, яке відповідає долому робочої частини зразка. На основі експериментальних результатів будували КДВР у вигляді залежностей швидкості росту тріщини V від максимального КІН циклу $K_{II \max}$ у подвійних логарифмічних координатах. Точки КДВР апроксимували лінією, що перетинала вертикальні межі координатної площини в значеннях $V = 10^{-10}$ та 10^{-4} m/cycle. З побудованих КДВР визначали характеристики ЦТ, а саме: основні – поріг втоми $K_{II th}$ і циклічну в'язкість руйнування $K_{II fc}$ як значення $K_{II \max}$ за швидкості РВТ $V = 10^{-10}$ і 10^{-4} m/cycle відповідно; додаткові – $K_{II 1-2}$ і $K_{II 2-3}$, які вказують на початок та кінець середньоамплітудної ділянки КДВР; а також K_{II}^* за швидкості РВТ $V = 10^{-7}$ m/cycle та параметр n_{II} , який характеризує кут нахилу середньоамплітудної ділянки КДВР. Для аналітичного опису цієї ділянки використали степеневу залежність

$$V = C_{II} (K_{II \max})^{n_{II}},$$

де C_{II} – параметр, який визначає розміщення апроксимаційної прямої середньо-амплітудної ділянки КДВР відносно осі ординат при $K_{II \max} = 1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

За поширенням тріщини слідували за допомогою катетометра В-630, а також камери TourTech UCMOS 10000KPA. Фрактографічні дослідження здійснювали на електронному сканувальному мікроскопі Zeiss EVO 40XVP.

Результати досліджень та їх обговорення. На основі результатів досліджень побудували КДВР сталі 65Г троостито-сорбітної структури для швидкостей РВТ у діапазоні до 6 порядків (рис. 2) з врахуванням експериментально визначеного коефіцієнта ТБТ $f_c = 0,72$. Як бачимо, побудована графічна залежність має S-подібну форму та характеризує кінетику РВТ за низько- ($V < 8,6 \cdot 10^{-9} \text{ m/cycle}$), середньо- ($V = 8,6 \cdot 10^{-9} \dots 4,6 \cdot 10^{-7} \text{ m/cycle}$) та високоамплітудних циклічних навантажень ($V > 4,6 \cdot 10^{-7} \text{ m/cycle}$). Використовуючи цю залежність, визначили, що $K_{II th} = 14,8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, $K_{II}^* = 32 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, $K_{II f_c} = 58 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, $K_{II 1-2} = 18 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, $K_{II 2-3} = 43 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, а також встановили, що $n_{II} = 4,69$. Невеликий розкид точок на КДВР свідчить про досягнення стабільного РВТ у напрямку дії максимальних

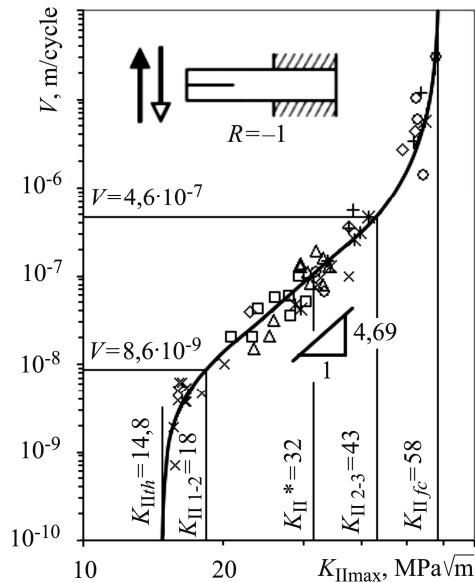


Рис. 2. Кінетична діаграма втомного руйнування термозміцненої сталі 65Г троостито-сорбітної структури за поперечного зсуву ($f_c = 0,72$).

Fig. 2. Curve of fatigue crack growth rates of heat treated 65G steel with troostite-sorbite structure under transverse shear ($f_c = 0.72$).

раніше [11] для інших її структур (див. таблицю). Аналіз степеневих залежностей показує, що з укрупненням структури (з підвищенням температури відпуску) ЦТ сталі 65Г на низькоамплітудній ділянці КДВР ($K_{II \max} < 18 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) знижуватиметься, тобто $V^{(C)} > V^{(T+C)} > V^{(T)}$ (рис. 6). На високоамплітудній ділянці – тенденції будуть протилежними. Необхідно зазначити, що коефіцієнт ТБТ f_c з переходом структури сталі 65Г від трооститу до сорбіту зменшується в 1,75 рази.

зсувних напружень τ_{\max} в макрооб'ємах матеріалу на нейтральній лінії зразка (рис. 3). Це забезпечили такі чинники: напрямні канавки в зразку, які зменшують площу його нето перерізу, збільшуючи концентрацію дотичних напружень на продовженні надрізу; стискальні напруження на берегах зсувної тріщини нормальні до площини поширення тріщини (рис. 4), що мінімізує можливе руйнування нормальним відривом (механізм I); навантаження зразка, яке відбувається за симетричним синусоїдним циклом, що забезпечує симетрію полів деформацій в зоні передруйнування на продовженні тріщини (рис. 5); камертоноподібна форма і полочки, які забезпечують стійкість зразка в площині деформування консольним згином і унеможливають його перекося, не допускаючи руйнування повздовжнім зсувом (механізм III).

Результати дослідження опірності сталі 65Г троостито-сорбітної структури РВТ за середньоамплітудних навантажень порівнювали з отриманими

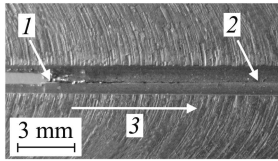


Рис. 3. Fig. 3.

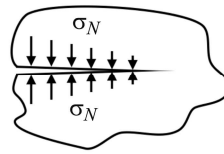


Рис. 4. Fig. 4.

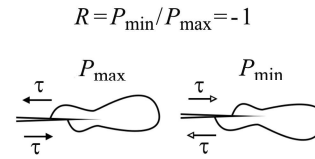


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 3. Втомна тріщина довжиною $a = 11,5$ mm, утворена циклічним поперечним зсувом: 1 – вершина надрізу; 2 – вершина тріщини; 3 – напрям росту тріщини.

Fig. 3. Fatigue crack of length $a = 11.5$ mm formed by cyclic transverse shear: 1 – notch tip; 2 – crack tip; 3 – crack growth direction.

Рис. 4. Схема дії нормальних стискальних напружень на берегах зсувної тріщини.

Fig. 4. Scheme of normal compression stresses action on shear crack faces.

Рис. 5. Схема полів деформацій на продовженні тріщини за симетричного циклу навантаження.

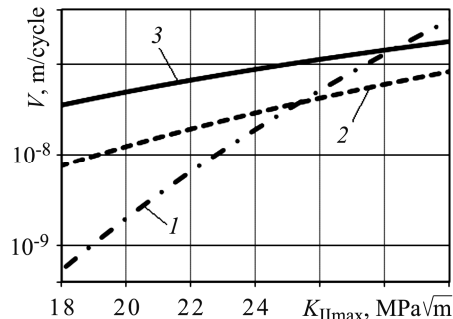
Fig. 5. Scheme of deformations field in crack tip process zone under symmetric loading cycle.

Вплив структури на кінетику РВТ в термозміцненій сталі 65Г

Температура відпуску, °C	Тип структури	Коефіцієнт ТБТ f_c	Вигляд степеневі залежності
400	троостит (Т)	0,84	$V = 1,49 \cdot 10^{-25} (K_{II \max})^{12,39}$
500	троостито-сорбіт (Т + С)	0,72	$V = 9,76 \cdot 10^{-15} (K_{II \max})^{4,69}$
600	сорбіт (С)	0,48	$V = 3,94 \cdot 10^{-12} (K_{II \max})^{3,15}$

Рис. 6. Вплив структури сталі 65Г на кінетику РВТ за поперечного зсуву: 1 – троостит; 2 – троостито-сорбіт; 3 – сорбіт.

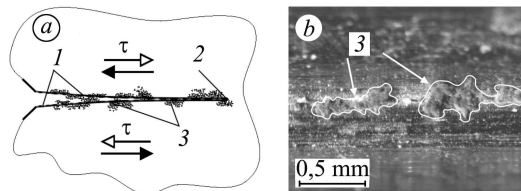
Fig. 6. Influence of 65Г steel microstructure on fatigue crack growth kinetics under transverse shear: 1 – troostite; 2 – troostite-sorbite; 3 – sorbite.



Під час експериментальних досліджень втомного руйнування троостито-сорбітної структури сталі 65Г встановили, що внаслідок контактної взаємодії берегів тріщини за зсуву відбувалося їхнє взаємне зношування, а на поверхню канавок виділялися продукти тертя у вигляді дисперсного порошку (рис. 7). Подібні процеси спостерігали [3, 4] під час дослідження РВТ за поперечного зсуву в колісній сталі R8Т перлітної структури та алюмінієвому сплаві LY12СZ.

Рис. 7. Схема циклічного зсуву (а) та продукти тертя (b) берегів тріщини: 1 – береги тріщини; 2 – вершина тріщини; 3 – продукти тертя.

Fig. 7. Scheme of cyclic shear (a) and friction products (b) of crack faces: 1 – crack faces; 2 – crack tip; 3 – wear debris.



Внаслідок такого абразивного зношування відбувалося притирання поверхонь берегів тріщини з втратою матеріалу в зоні контакту. Тому за повного розвантаження зразка ($P = 0$) між берегами тріщини утворювався деякий зазор, який для тріщини довжиною $a = 11,5$ mm становив $0,15 \dots 0,2$ mm. Під час навантаження зразка ($P > 0$) верхній берег тріщини наближався до нижнього аж до їх повного контакту, а зазор між ними зникав. Для тріщин нормального відриву за випробувань стандартних зразків циклічним розтягом такої взаємодії берегів не спостерігали [13]. Тріщини розкривалися, утворювався зазор між берегами, коли $P > P_{\text{open}} > 0$ і закривалися (зазор між берегами зникав), коли $P < P_{\text{open}}$. На основі фрактографічного аналізу зламів зразків встановили, що втомне руйнування відбувається через зсув матеріалу (рис. 8), внаслідок чого утворюються площини гладкого розшарування і так звані “язики зрізу”, тоді як за циклічного нормального відриву виникають “ямки” або відкольні фасетки [13, 14]. За низьких швидкостей РВТ, близьких до $V \approx 10^{-9}$ m/cycle, “язики зрізу” (рис. 8a) виникають доволі часто, тоді як за високих швидкостей $V \approx 10^{-6}$ m/cycle – рідше, бо домінують площини гладкого розшарування (рис. 8b).

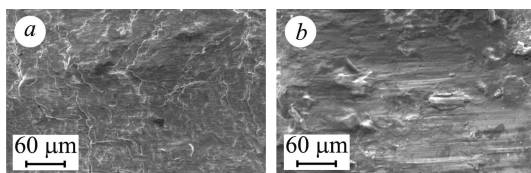


Рис. 8. Фрактографія зламів зразків за низьких (a) та високих (b) швидкостей росту втомної тріщини за поперечного зсуву.

Fig. 8. Fractography of fractured specimens at low (a) and high (b) crack growth rates under transverse shear.

ВИСНОВКИ

Побудовано повну кінетичну діаграму втомного руйнування за поперечного зсуву термозміцненої сталі 65Г та встановлено, що низькоамплітудна ділянка цієї діаграми обмежується значеннями $K_{II\ th} = 14,8$ МПа \sqrt{m} та $K_{II\ 1-2} = 18$ МПа \sqrt{m} з утворенням “язиків зрізу” на поверхні втомного зламу, а високоамплітудна – значеннями $K_{II\ 2-3} = 43$ МПа \sqrt{m} та $K_{II\ fc} = 58$ МПа \sqrt{m} з утворенням площин гладкого розшарування. Показано, що для значень $K_{II\ max} < 25$ МПа \sqrt{m} троостито-сорбітна структура сталі 65Г чинить більший опір руйнуванню, ніж сорбітна, та менший, ніж трооститна. Встановлено, що за руйнування циклічним поперечним зсувом береги тріщини піддаються інтенсивному зношуванню, внаслідок чого відбувається мікрОВикришування матеріалу з їх поверхонь.

РЕЗЮМЕ. Исследована кинетика сдвиговой макротрещины при усталостном нагружении поперечным сдвигом термоупрочненной стали 65Г троостито-сорбитной структуры при низко-, средне- и высокоамплитудных циклических нагрузках. Построено кинетическую диаграмму усталостного разрушения с учетом трения берегов сдвиговой трещины в диапазоне скоростей ее роста до 6 порядков. На основе построенной графической зависимости определены основные и добавочные характеристики циклической трещиностойкости. Исследованы контактное взаимодействие берегов усталостной трещины и фрактографические особенности при низко- и высокоамплитудном деформировании циклическим поперечным сдвигом.

SUMMARY. Shear macrocrack kinetics under fatigue fracture of heat treated 65Г steel with troostite-sorbite microstructure under transverse shear at low, middle and high amplitudes cyclic loading was investigated. Fatigue crack growth curve was plotted with account of shear crack faces friction in the range, which included 6 rates. On the base of the obtained graphical dependence the basic and additional cyclic crack growth resistance characteristics were evaluated. Fatigue crack faces contact interaction and fractography features of fracture at low and high amplitudes of deformation under cyclic transverse shear were studied.

1. *Subsurface initiated rolling contact fatigue of railway wheels as generated by rail corrugation* / A. Ekberg, E. Kabo, J. C. O. Nielsen, R. Lundén // *Int. J. of Solids and Structures*. – 2007. – **44**, № 24. – P. 7975–7987.
2. *Про концепцію вибору сталей для високоміцних залізничних коліс* / О. П. Осташ, В. Г. Анофрієв, І. М. Андрейко, Л. А. Мурадян, В. В. Кулик // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2012. – **48**, № 6. – С. 7–13.
(*On the concept of selection of steels for high-strength railroad wheels* / O. P. Ostash, V. H. Anofriev, I. M. Andreiko, L. A. Muradyan, V. V. Kulyk // *Materials Science*. – 2013. – **48**, № 6. – P. 697–703.)
3. *Analysis of wear debris in rolling contact fatigue cracks of pearlitic railway wheels* / K. Cvetkovski, J. Ahlström, M. Norell, C. Persson // *Wear*. – 2014. – **314**, № 1–2. – P. 51–56.
4. *Fatigue crack growth under mode II loading* / M. O. Wang, R. H. Hu, C. F. Qian, J. C. M. Li // *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* – 1995. – **18**, № 12. – P. 1443–1454.
5. *Datsyshyn O. P., Panasyuk V. V., and Glazov A. Yu. Modeling of fatigue contact damages formation in rolling bodies and assessment of their lifetime* // *Wear*. – 2011. – **271**, № 1–2. – P. 186–194.
6. *Ленковський Т. М. Визначення характеристик циклічної тріщиностійкості сталей за поперечного зсуву (Огляд)* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2014. – **50**, № 3. – С. 29–37.
(*Lenkovs'kyi T. M. Determination of the characteristics of cyclic crack resistance of steels under transverse shear (A Survey)* // *Materials Science*. – 2014. – **50**, № 3. – P. 340–349.)
7. *Патент на корисну модель № 74163. Зразок для визначення характеристик циклічної тріщиностійкості конструкційних матеріалів за поперечного зсуву* / Я. Л. Іваницький, Т. М. Ленковський, С. Т. Штаюра, Ю. В. Мольков. – Оpubл. 25.10.2012; Бюл. № 20.
8. *Патент на корисну модель № 73715. Установка для утворення втомної тріщини поперечного зсуву в балковому зразку* / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, Т. М. Ленковський, Ю. В. Мольков, Ю. І. Квашневський. – Оpubл. 10.10.2012; Бюл. № 19.
9. *Методика побудови кінетичних діаграм втомного руйнування сталей за поперечного зсуву з врахуванням тертя берегів тріщини* / Я. Л. Іваницький, Т. М. Ленковський, В. М. Бойко, С. Т. Штаюра // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2013. – **49**, № 6. – С. 41–45.
(*Methods for the construction of the kinetic diagrams of fatigue fracture for steels under the conditions of transverse shear with regard for the friction of crack lips* / Ya. L. Ivanys'kyi, T. M. Lenkovs'kyi, V. M. Boiko, S. T. Shtayura // *Materials Science*. – 2014. – **49**, № 6. – P. 749–754.)
10. *Кунь П. С., Штаюра С. Т., Ленковський Т. М. Визначення коефіцієнта інтенсивності напружень для тріщини поперечного зсуву у балковому зразку* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2014. – **50**, № 2. – С. 50–53.
(*Kun P. S., Shtayura S. T., Lenkovs'kyi T. M. Determination of the stress intensity factor for a transverse shear crack in a beam specimen* // *Materials Science*. – 2014. – **50**, № 2. – P. 212–216.)
11. *Ленковський Т. М. Вплив тертя берегів тріщини на циклічну тріщиностійкість сталі 65Г за поперечного зсуву* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2014. – **50**, № 5. – С. 53–57.
(*Lenkovs'kyi T. M. Influence of the friction of crack faces on the cyclic crack-growth resistance of 65G steel under mode II loading* // *Materials Science*. – 2015. – **50**, № 5. – P. 682–686.)
12. *ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение*. – Введ. 01.01.86.
13. *Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка*. – Т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин, Н. А. Махутов, М. М. Стадник. – К.: Наук. думка, 1990. – 680 с.
14. *Романів О. М., Зима Ю. В., Карпенко Г. В. Електронна фрактографія зміцнених сталей*. – К.: Наук. думка, 1974. – 208 с.

Одержано 18.01.2016