

УДК 620.178.3:539.421.2

ОПІРНІСТЬ ТЕРМОЗМІЩЕНОЇ СТАЛІ 65Г РОСТУ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ ЗА ПОПЕРЕЧНОГО ЗСУВУ

Т. М. ЛЕНКОВСЬКИЙ

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

Побудовано кінетичні діаграми втомного руйнування сталі 65Г за поперечного зсуву після різних термообробок в діапазоні швидкостей втомної тріщини у 6 порядків з використанням коефіцієнта інтенсивності напружень для оцінювання напружено-деформованого стану в околі її вершини. Визначено основні та додаткові характеристики циклічної тріщиностійкості з врахуванням тертя берегів втомної тріщини. Побудовано діаграми конструкційної міцності та підтверджено гіпотезу підвищення порогів втоми в умовах зсуву із підвищенням границі плинності сталі 65Г.

Ключові слова: *поперечний зсув, кінетична діаграма втомного руйнування, характеристики циклічної тріщиностійкості, міцність за зрізу, діаграма конструкційної міцності, поріг втоми.*

Щоб прогнозувати та забезпечити розрахунковий ресурс роботи деталей машин та елементів металоконструкцій, які працюють за циклічних навантажень, необхідно знати про опірність конструкційних сталей росту втомних тріщин (РВТ). З огляду на це, в науковій та інженерній практиці використовують методи механіки руйнування, які базуються на побудові кінетичних діаграм втомного руйнування (КДВР) сталей та визначенні характеристик їх циклічної тріщиностійкості (ЦТ). При руйнуванні за макромеханізмом нормального відриву КДВР побудовані для багатьох класів конструкційних сталей, а визначені на основі цих діаграм характеристики ЦТ сьогодні є довідниковими даними. Однак руйнування матеріалу деталей машин, які працюють за складного циклічного чи динамічного навантажень, відбувається за мішаними або зсувними макромеханізмами [1–5]. Зокрема, для кочення із утворенням дефектів типу відшарувань за контактної втоми домінуючим є макромеханізм поперечного зсуву, за якого береги підростаючої тріщини зміщуються перпендикулярно до її фронту [1, 6–10]. Тому вибирати оптимальні матеріали для забезпечення роботоздатності виробів за таких умов необхідно з урахуванням характеристик їх ЦТ за поперечного зсуву. Відомостей про них, а також діаграм у вигляді залежностей характеристик ЦТ від характеристик міцності сталей в літературі обмаль. Мета цієї роботи – на основі КДВР за поперечного зсуву визначити характеристики ЦТ сталі 65Г після різних термообробок та побудувати діаграми конструкційної міцності.

Обладнання та методика досліджень. Зразки для випробувань виготовляли з гарячевальцьованої плити товщиною 10 mm зі сталі 65Г. Для отримання сталі різної міцності зразки гартували з 820°C в оливу з відпусками за температур $t_a = 600^\circ\text{C}$, 500, 400 та 300°C упродовж 1 h. Характеристики міцності за зрізу визначали на десятикратних циліндричних зразках діаметром $d = 5$ mm, згідно з рекомендаціями [11]. Для цього використали спеціальний пристрій (рис. 1). Він має вигляд гільйотини і складається з корпусу 1, в який з обох сторін монтують втулки 2 з центральними отворами, взаємну співвісність яких виставляють та фіксують

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

гайками 3. У верхній частині корпусу є шахта, в якій у вертикальному напрямі внаслідок дії зусилля p переміщується ніж 4, що передає навантаження на кільце 5, яке, проковзуючи між втулками, деформує зсувом зразок 6. ТензOMETричний давчач переміщень встановлювали на опори 7, що розміщені на верхній фронтальній частині корпусу гільйотини і на видимій частині ножа.

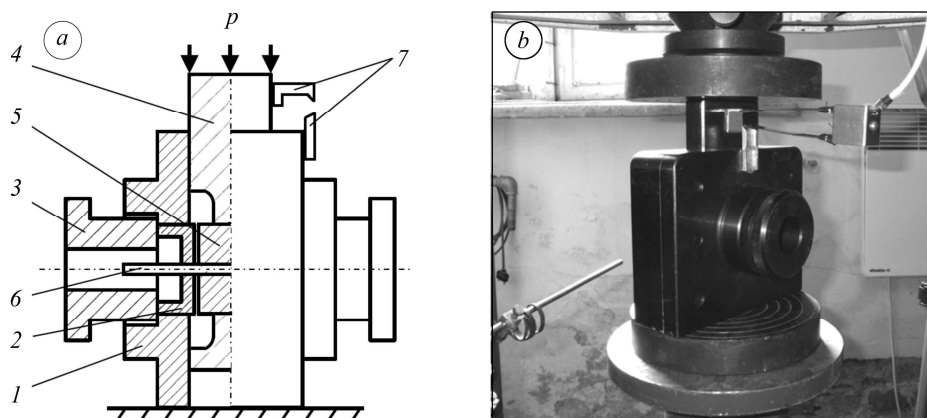


Рис. 1. Конструктивна схема (а) та загальний вигляд пристрою (b) для статичного деформування циліндричних зразків зрізом: 1 – корпус; 2 – втулка; 3 – гайка; 4 – ніж; 5 – кільце; 6 – зразок; 7 – опори.

Fig. 1. Structural scheme (a) and general view of device (b) for cylindrical specimens static deformation under shear: 1 – case; 2 – bush; 3 – screw; 4 – knife; 5 – ring; 6 – specimen; 7 – supports.

Зусилля, прикладене до зразка, та зміщення ножа реєстрували за допомогою аналого-цифрового перетворювача Е-440 та персонального комп'ютера, на якому в реальному часі отримували відповідну графічну залежність “зусилля P –зсув Δ ”. На основі цих залежностей будували діаграми статичного деформування термозміцнених зразків за зрізу в координатах “деформація γ –напруження τ ”, при цьому напруження τ визначали з виразу $\tau = 2P/\pi d^2$. Далі з діаграм встановлювали умовну границю плинності $\tau_{0,3}$ та границю міцності τ_B (рис. 2) так, як це роблять за нормального відриву. Твердість сталі за Роквеллом визначали твердоміром ТК-2.

Для випробувань за умов циклічного поперечного зсуву балкові зразки з крайовим надрізом та довжиною робочої частини $b = 72$ mm і товщиною стінки $t = 3,2$ mm навантажували консольним згином з частотою 12 Hz за асиметрії циклу $R = -1$, згідно із стандартом [12]. Поширення тріщини реєстрували за допомогою катетометра В-630, а також камери TourTech UCMOS 10000KPA. КДВР будували з врахуванням тертя берегів тріщини (ТБТ) та без нього (приймали під час обчислень K_{II} коефіцієнт ТБТ $f_c = 0$) у вигляді залежностей швидкості РВТ V від максимального коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) циклу

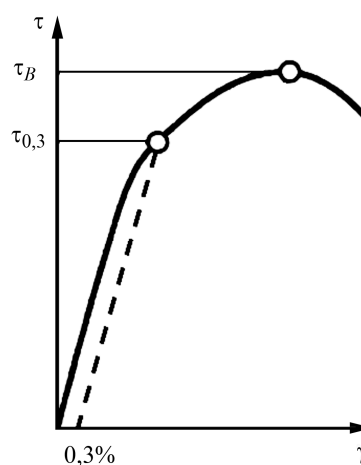


Рис. 2. Схематична діаграма деформування сталевого зразка зрізом.

Fig. 2. Schematic diagram of deformation of steel specimen under shear.

$K_{II \max}$ у діапазоні відносних довжин тріщини $0,40 \leq \lambda \leq 0,55$ у подвійних логарифмічних координатах. Точки КДВР апроксимували лініями, що перетинали вертикальні межі координатної площини в значеннях $V = 10^{-10}$ та 10^{-4} m/cycle. На основі побудованих КДВР визначали характеристики ЦТ, а саме: основні – поріг втоми $K_{II \text{ th}}$ і циклічну в'язкість руйнування $K_{II \text{ fc}}$, 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. Також встановлювали параметри n_{II} (характеризує кут нахилу апроксимаційної прямої середньоамплітудної ділянки КДВР) та C_{II} (визначає положення цієї прямої відносно осі ординат при $K_{II \max} = 1 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$).

Результати досліджень та їх обговорення. Встановлено, що зі зменшенням температури відпуску характеристики міцності за зрізу ($\tau_{0,3}$, τ_B) зростають (табл. 1). Аналогічні залежності для характеристик міцності за розтягу ($\sigma_{0,2}$, σ_B) спостерігали раніше [13].

Таблиця 1. Механічні властивості сталі 65Г після гартування та відпуску

Температура відпуску t_α , °C	Характеристики міцності		Твердість HRC
	$\tau_{0,3}$	τ_B	
	МПа		
600	490	690	32
500	650	860	39
400	780	990	44
300	950	1170	54

Побудовані КДВР з врахуванням ТБТ (рис. 3а) та без нього (рис. 3б) мають S-подібну форму, яка зі збільшенням умовної границі плинності за зрізу $\tau_{0,3}$ наближається до лінії, паралельної до осі ординат.

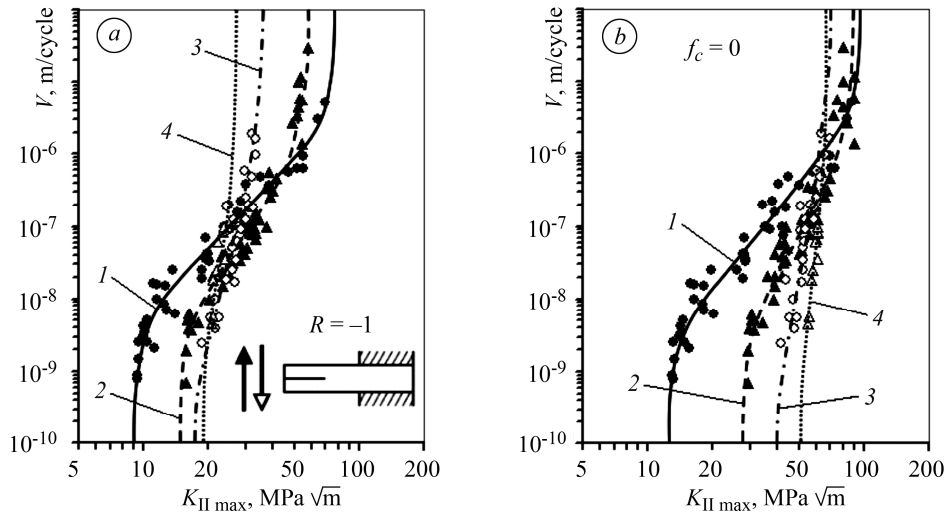


Рис. 3. КДВР сталі 65Г різної міцності, побудовані з врахуванням ТБТ, згідно з працею [13] (а), та без нього (б): 1 – $\tau_{0,3} = 490$ МПа; 2 – 650; 3 – 780; 4 – $\tau_{0,3} = 950$ МПа.

Fig. 3. Fatigue crack growth rate curves of 65Г steel with various toughness plotted taking into account crack faces friction (CFF) according to paper [13] (a) and without it (b):

1 – $\tau_{0,3} = 490$ МПа; 2 – 650; 3 – 780; 4 – $\tau_{0,3} = 950$ МПа.

Слід зауважити, що для $K_{II\max}$, близьких до $25 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, та швидкості РВТ $V \approx 10^{-7} \text{ м/цикл}$ є характерна ділянка, в якій графічні залежності, побудовані з врахуванням ТБТ (рис. 3а), для сталей різної міцності перетинаються, тобто відбувається інверсія опірності РВТ. На діаграмах, побудованих без врахування ТБТ (рис. 3б), цей ефект спостерігаємо для $K_{II\max} \approx 70 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ та $V \approx 10^{-6} \text{ м/цикл}$. Для низькоамплітудної ділянки діаграми ($V \leq 10^{-8} \text{ м/цикл}$) характерне те, що сталь з вищою міцністю чинить більший опір втомному руйнуванню, ніж сталь з меншою міцністю. Для високоамплітудної ділянки ($V \geq 10^{-6} \text{ м/цикл}$) більшу опірність руйнуванню має сталь з меншою міцністю. Ці тенденції спостерігаємо для обох випадків. Якщо групувати діаграми за подібністю, то це доцільно зробити послідовно в напрямку зростання $\tau_{0,3}$. Тобто кінетика РВТ в сталі з $\tau_{0,3} = 490 \text{ МПа}$ близька до кінетики в сталі з $\tau_{0,3} = 650 \text{ МПа}$, а в сталі з $\tau_{0,3} = 780$ – до сталі з $\tau_{0,3} = 950 \text{ МПа}$. Визначені із побудованих КДВР основні та додаткові характеристики ЦТ подані в табл. 2.

Таблиця 2. Характеристики ЦТ сталі 65Г різної міцності

Умовна границя плинності за зрізу $\tau_{0,3}$, МПа	Характеристики ЦТ				Параметри рівняння середньої ділянки КДВР	
	$K_{II\text{th}}$	$K_{II\text{1-2}}$	$K_{II\text{2-3}}$	$K_{II\text{fc}}$	C_{II} , ($\text{МПа}\sqrt{\text{м}}\text{)}^{-n_{II}} \cdot \text{м/цикл}$	n_{II}
	$\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$					
490	$\frac{9,0}{12,6}$	$\frac{14}{21}$	$\frac{50}{62}$	$\frac{76}{97}$	$\frac{3,935 \cdot 10^{-12}}{1,812 \cdot 10^{-13}}$	$\frac{3,154}{3,737}$
650	$\frac{14,8}{27,9}$	$\frac{18}{36}$	$\frac{43}{68}$	$\frac{58}{88}$	$\frac{9,764 \cdot 10^{-15}}{1,364 \cdot 10^{-17}}$	$\frac{4,691}{5,735}$
780	$\frac{17,3}{40,0}$	$\frac{20}{44}$	$\frac{29}{57}$	$\frac{36}{71}$	$\frac{1,499 \cdot 10^{-25}}{2,022 \cdot 10^{-38}}$	$\frac{12,394}{17,655}$
950	$\frac{19,2}{51,0}$	$\frac{21}{54}$	$\frac{24}{61}$	$\frac{27}{65}$	$\frac{1,209 \cdot 10^{-38}}{1,482 \cdot 10^{-62}}$	$\frac{22,441}{30,723}$

Примітка: значення подані в чисельнику визначали з врахуванням ТБТ, а в знаменнику – без нього.

Таким чином, встановлено, що з підвищенням $\tau_{0,3}$ з 490 до 950 МПа $K_{II\text{th}}$, визначене з врахуванням ТБТ, зростає з 9 до $19,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, а $K_{II\text{fc}}$ знижується з 76 до $27 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Водночас параметр n_{II} зростає з 3,154 до 22,441.

На основі визначених характеристик ЦТ сталі 65Г після різних термообробок побудовано діаграми конструкційної міцності (рис. 4), де змінним параметром є умовна границя плинності за зрізу $\tau_{0,3}$. Показано, що встановлені тенденції зміни характеристик ЦТ зберігаються навіть за їх визначення без врахування ТБТ.

Отримані графічні залежності схематично зіставлено з аналогічними, відомими для руйнування сталі 65Г нормальним відривом [14] (рис. 5). Залежності циклічної в'язкості руйнування K_{fc} та степеневого показника n від умовної границі плинності сталі подібні, а порогів втоми K_{th} – обернені.

Для підтвердження достовірності результатів з оцінювання поширення тріщини, отриманих для поперечного зсуву, числові значення порогів втоми сталі 65Г різної міцності зіставляли з відомими значеннями для інших конструкційних сталей. Для цього будували діаграму в координатах “границя міцності σ_B –порог втоми $K_{II\text{th}}$ ” (рис. 6). Необхідно зазначити, що для коректного зіставлення $K_{II\text{th}}$ визначали з виразу $K_{II\text{th}} = \Delta K_{II\text{th}} / (1-R)$, де $\Delta K_{II\text{th}}$ – пороговий розмах максимально-

го КІН у циклі навантаження. З побудованої залежності (рис. 6) слідує, що отримані результати добре корелюють з результатами інших дослідників.

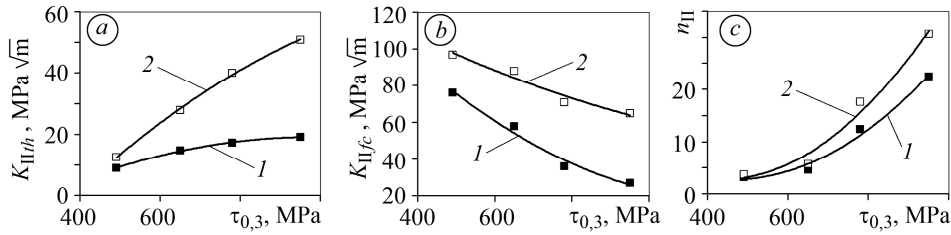


Рис. 4. Вплив умовної границі плинності зрізу сталі 65Г на поріг втоми (а), циклічну в'язкість руйнування (б) та параметр n_{II} (с) з врахуванням ТБТ (1) та без нього (2).

Fig. 4. Influence of yield shear stress of 65Г steel on fatigue threshold (a), cyclic fracture toughness (b) and parameter n_{II} (c) with account of CFF (1) and without it (2).

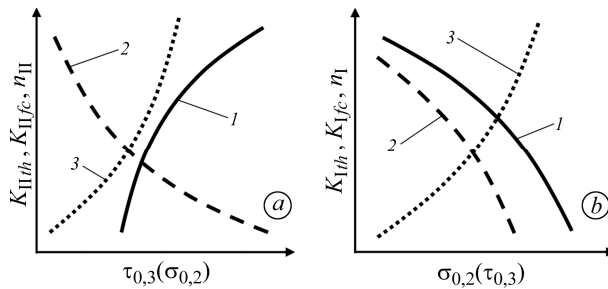


Рис. 5. Схематичні залежності характеристик ЦТ за поперечного зсуву (а) та нормального відриву (б) від характеристик міцності сталі 65Г: 1 – K_{IIth} ; 2 – K_{IIfc} ; 3 – n .

Fig. 5. Schematic dependences of fatigue crack growth characteristics versus strength characteristics of 65Г steel under transverse shear (a) and normal tension (b): 1 – K_{IIth} ; 2 – K_{IIfc} ; 3 – n .

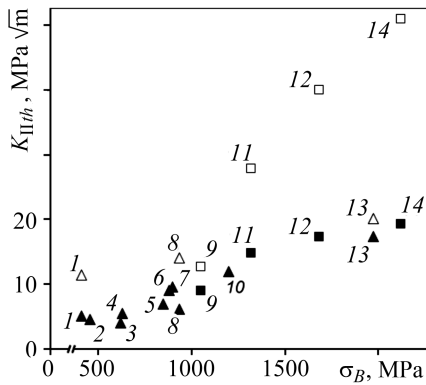


Рис. 6. Залежність порогів втоми за поперечного зсуву від границі міцності сталей за встановленими результатами (■, □) та за літературними даними (▲, △) з врахуванням ТБТ (▲, ■) та без нього (△, □): 1 – SS41 ($R = -1$) [1, 9]; 2 – м'яка сталь ($R = 0,29$) [6]; 3 – S45C ($R = -1$) [3]; 4 – сталь з 0,47% С ($R = -1$) [2]; 5 – колісна сталь ($R = 0,33$) [7]; 6 – SKH ($R = -1$) [1]; 7 – GH ($R = -1$) [1]; 8 – рейкова сталь ($R = -1$) [1, 9]; 9 – 65Г ($R = -1$); 10 – SKH ($R = -1$) [7]; 11 – 65Г ($R = -1$); 12 – 65Г ($R = -1$); 13 – M250 ($R = 0$) [10]; 14 – 65Г ($R = -1$).

Fig. 6. Dependence of fatigue threshold under transverse shear on ultimate stress for steel according to the obtained results (■, □) and literature data (▲, △) taking into account CFF (▲, ■) and without (△, □): 1 – SS41 ($R = -1$) [1, 9]; 2 – mild steel ($R = 0,29$) [6]; 3 – S45C ($R = -1$) [3]; 4 – 0.47% C steel ($R = -1$) [2]; 5 – wheel steel ($R = 0,33$) [7]; 6 – SKH ($R = -1$) [1]; 7 – GH ($R = -1$) [1]; 8 – rail steel ($R = -1$) [1, 9]; 9 – 65Г steel ($R = -1$); 10 – SKH ($R = -1$) [7]; 11 – 65Г steel ($R = -1$); 12 – 65Г steel ($R = -1$); 13 – M250 ($R = 0$) [10]; 14 – 65Г steel ($R = -1$).

ВИСНОВКИ

Визначено характеристики циклічної тріщиностійкості сталі 65Г після різних термообробок на основі кінетичних діаграм втомного руйнування за поперечного зсуву. Встановлено тенденцію зростання порогів втоми з підвищенням умовної границі плинності сталі на відміну від їх зниження за нормального відриву, тоді як для циклічної в'язкості руйнування тенденції подібні.

РЕЗЮМЕ. Побудовано кінетическіе діаграми усталостного руйнування сталі 65Г при поперечному сдвиге после различных термообработок в диапазоне скоростей роста усталостной трещины в 6 порядков с использованием коэффициента интенсивности напряжений для оценки напряженно-деформированного состояния в окрестности ее вершины. Определены основные и дополнительные характеристики циклической трещиностойкости с учетом трения берегов усталостной трещины. Построены диаграммы конструкционной прочности и подтверждена гипотеза повышения порогов усталости в условиях сдвига с повышением предела текучести стали 65Г.

SUMMARY. Fatigue crack growth rate curves for 65Г steel after various heat treatments in the rate range of 6 orders using the stress intensity factor for estimation of stress-strain state in the process zone of the transverse shear fatigue crack tip were plotted. The basic and additional fatigue crack growth resistance characteristics were determined taking into account the fatigue crack edges friction. The structural strength diagrams were plotted, and the hypothesis of the fatigue thresholds increase in the terms of displacement with the yield stress growth of 65Г steel was confirmed.

1. Murakami Y., Sakae C., and Hamada S. Mechanism of rolling contact fatigue and measurement of $\Delta K_{II,th}$ for steels / Eds.: J. H. Beynon, M. W. Brown, T. C. Lindley et al. // Eng. Against Fatig. – Rotterdam: A. A. Balkema Publ., 1999. – P. 473–485.
2. Fatigue crack path and threshold in Mode II and Mode III loadings / Y. Murakami, Y. Fukushima, K. Toyama, and S. Matsuoka // Eng. Fract. Mech. – 2008. – **75**, № 3. – P. 306–318.
3. Murakami Y., Takahashi K., and Kusumoto R. Threshold and growth mechanism of fatigue cracks under mode II and III loadings // Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct. – 2003. – **26**, № 6. – P. 523–531.
4. Mode III fatigue crack propagation in low alloy steel / R. O. Ritchie, F. A. McClintock, H. Nayeb-Hashemi, and M. A. Ritter // Metallurgical Transactions A. – 1982. – **13**, № 1. – P. 101–110.
5. Напружений стан циліндра з зовнішньою кільцевою тріщиною за динамічного закруту / Я. Л. Іваницький, В. М. Бойко, І. В. Ходань, С. Т. Штайора // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – **43**, № 2. – С. 55–64.
(Ivanyts'kyi Ya. L., Boiko V. M., Khodan' I. V., and Shtayura S. T. Stressed state of a cylinder with external circular crack under dynamic torsion // Materials Science. – 2007. – **43**, № 2. – P. 203–214.)
6. Hellier A. K. and Zarrabi K. On the mode II fatigue threshold for mild steel // Int. J. Fract. – 2011. – **167**, № 2. – P. 267–272.
7. Murakami Y., Fukuhara T., and Hamada S. Measurement of Mode II threshold stress intensity range $\Delta K_{II,th}$ // J. Soc. Mater. Sci. – 2002. – **51**, № 8. – P. 918–925.
8. Методика побудови кінетических діаграм втомного руйнування сталей за поперечного зсуву з врахуванням тертя берегів тріщини / Я. Л. Іваницький, Т. М. Ленковський, В. М. Бойко, С. Т. Штайора // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – **49**, № 6. – С. 41–45.
(Ivanyts'kyi Ya. L., Lenkovs'kyi T. M., Boiko V. M., and Shtayura S. T. 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 // Materials Science. – 2014. – **49**, № 6. – P. 749–754.)
9. Murakami Y. and Hamada S. A new method for measurement of mode II fatigue threshold stress intensity factor range $\Delta K_{\tau,th}$ // Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct. – 1997. – **20**, № 6. – P. 863–870.
10. Pinna C. and Doquet V. The preferred fatigue crack propagation mode in M250 maraging steel loaded in shear // Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct. – 1999. – **22**, № 3. – P. 173–183.
11. ОСТ 1.90148-74. Металлы. Метод испытания на срез. – Введ. 01.07.1975.
12. ДСТУ 8601:2015. Розрахунки і випробування на міцність. Методика визначення характеристик циклічної тріщиностійкості металів за поперечного зсуву та кімнатної температури. – Чин. від 2017.01.01.
13. Influence of 65G steel microstructure on crack faces friction factor under mode II fatigue fracture / Y. L. Ivanytskyj, T. M. Lenkovskiy, Y. V. Molkov, V. V. Kulyk, and Z. A. Duriagina // Archives of Mater. Sci. and Eng. – 2016. – **82**, № 2. – P. 49–56.
14. Ярема С. Я., Попович Вас. Вас., Зима Ю. В. Влияние структуры на сопротивление стали 65Г росту усталостной трещины // Физ.-хим. механика материалов. – 1982. – **18**, № 1. – С. 16–30.
(Yarema S. Ya., Popovich Vas. Vas., Zima Yu. V. Influence of structure on the resistance of 65G steel to fatigue crack growth // Soviet Materials Science. – 1982. – **18**, № 1. – P. 13–26.)

Одержано 28.11.2016