

УДК 620.178.3:539.421.2

## ВПЛИВ ТЕРТЯ БЕРЕГІВ ТРІЩИНИ НА ЦИКЛІЧНУ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ СТАЛІ 65Г ЗА ПОПЕРЕЧНОГО ЗСУВУ

Т. М. ЛЕНКОВСЬКИЙ

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

Досліджено руйнування сталі 65Г за циклічного навантаження поперечним зсувом на балкових зразках з боковою тріщиною. Експериментально визначено коефіцієнт тертя берегів тріщини на зразках зі сталі з трооститною структурою та побудовано кінетичні діаграми втомного руйнування. Встановлено вплив тертя берегів тріщини на циклічну тріщиностійкість сталі 65Г за поперечного зсуву для трооститної та сорбітної структур залежно від швидкості росту втомної тріщини.

**Ключові слова:** *сталь 65Г, поперечний зсув, втомне руйнування, коефіцієнт тертя берегів тріщини, характеристики циклічної тріщиностійкості.*

Щоб достовірно оцінити роботоздатність деталей машин та елементів конструкцій, які працюють в умовах циклічного навантаження, необхідно знати про їх опірність поширенню тріщин, тобто мати відомості про циклічну тріщиностійкість (ЦТ) конструкційних матеріалів. Згідно з підходами механіки руйнування, ЦТ матеріалів зазвичай оцінюють під час циклічного деформування зразків з тріщинами за макромеханізмом нормального відриву (рис. 1а) [1]. Однак шестерні зубчастих передач, валки прокатних станів, кільця підшипників кочення, а також залізничні колеса та рейки працюють за умов контактної втоми [2–6], що спричиняє їх руйнування за поперечного зсуву (рис. 1b). Для них характеристики ЦТ необхідно визначати на підставі кінетичних діаграм втомного руйнування (КДВР), побудованих за поперечного зсуву [6].

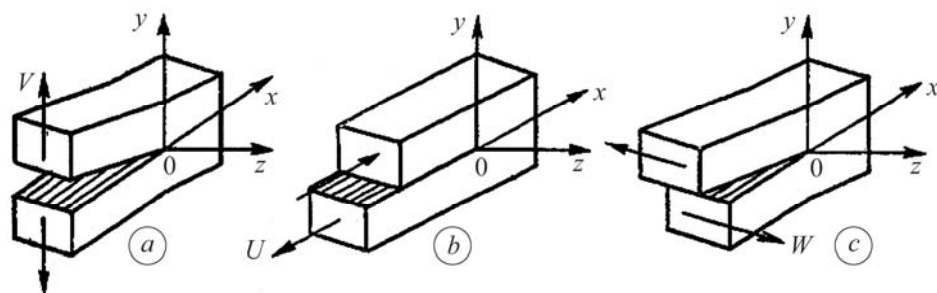


Рис. 1. Основні типи переміщень поверхнь тріщини: *a* – тип I (нормальний відрив), *b* – тип II (поперечний зсув), *c* – тип III (повздовжній зсув).

Fig. 1. Basic types of crack faces displacement: *a* – Mode I (normal tension), *b* – Mode II (transverse shear), *c* – Mode III (longitudinal shear).

На відміну від руйнування нормальним відривом береги тріщини за поперечного (рис. 1b) та повздовжнього (рис. 1c) зсувів перебувають у постійному контакті, що призводить до виникнення сили тертя. Як показують розрахункові

моделі, які враховують контакт берегів тріщини за поперечного зсуву [3, 4, 7], це впливає на напружено-деформований стан біля вершини тріщини, значно знижуючи коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН)  $K_{II}$ . Тому неврахування тертя берегів тріщини (ТБТ) під час визначення характеристик ЦТ робить некоректним використання їх в інженерних розрахунках довговічності чи залишкового ресурсу експлуатації деталей машин та елементів конструкцій, що працюють за умов деформування поперечним зсувом.

Мета роботи – встановити вплив ТБТ за умови поперечного зсуву на характеристики ЦТ конструкційної сталі 65Г, яка є аналогом сталі марки Т для залізничних суцільнокатаних коліс [8].

**Обладнання та методика досліджень.** Для дослідження росту втомної тріщини (РВТ) за поперечного зсуву використали балковий зразок з боковою тріщиною (рис. 2а), який циклічно навантажували згідно зі силовою схемою консольного згину за асиметрії циклу  $R = -1$  (рис. 2б).

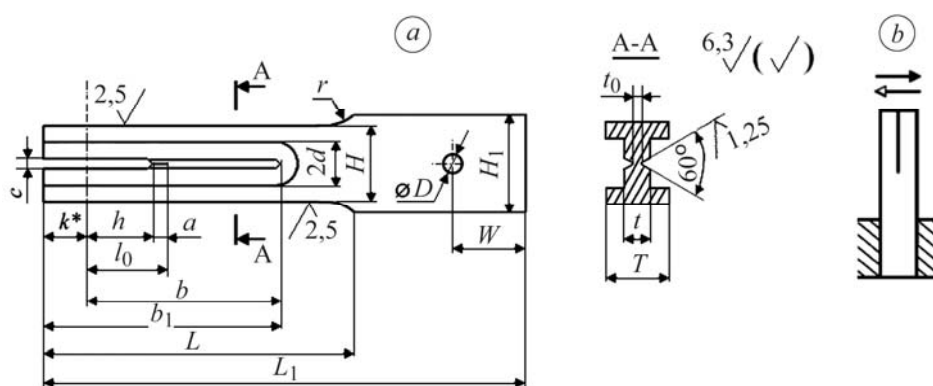


Рис. 2. Балковий зразок для визначення характеристик ЦТ конструкційних матеріалів за поперечного зсуву (а) та схема його навантаження (б).

Fig. 2. I-beam specimen for evaluation of fatigue crack growth resistance characteristics of structural materials under Mode II fracture (a) and its loading scheme (b).

Зразки вирізали з гарячевальцьованої плити товщиною 10 mm зі сталі 65Г. Щоб отримати високоміцну (трооститну) структуру сталі, серію зразків 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 гартували з  $820^\circ\text{C}$  в оливу з подальшим відпуском за температури  $400^\circ\text{C}$  упродовж 1 h, після чого наносили боковий надріз довжиною  $h = 25,2$  mm та V-подібні канавки до  $t_0 = 1,1$  mm.

Для дослідження РВТ за поперечного зсуву та побудови КДВР у координатах “максимальний КІН циклу  $K_{II \max}$  – швидкість поширення тріщини  $da/dN$ ” застосували запроповану раніше методику [7], за якою під час обчислення КІН  $K_{II \max}$  можна врахувати ТБТ, використавши в розрахунках експериментально встановлений коефіцієнт ТБТ  $f_c$ . Щоб встановити  $f_c$  для сталі 65Г з трооститною структурою, з випробуваних зразків (зруйнованих по всій довжині робочої частини б) вирізали фрагменти, які містять береги тріщини, та випробовували їх як пару тертя, використавши спеціальний пристрій (рис. 3). Коефіцієнт ТБТ обчислювали за формулою:

$$f_c = \frac{F}{P_N}, \quad (1)$$

де  $F$  – сила зсуву,  $P_N$  – сила притиску.

Виконавши серію експериментів, встановлювали усереднене значення коефіцієнта  $f_c$  та обчислювали  $K_{II \max}$  без врахування ТБТ (гладкий контакт) та з його врахуванням.

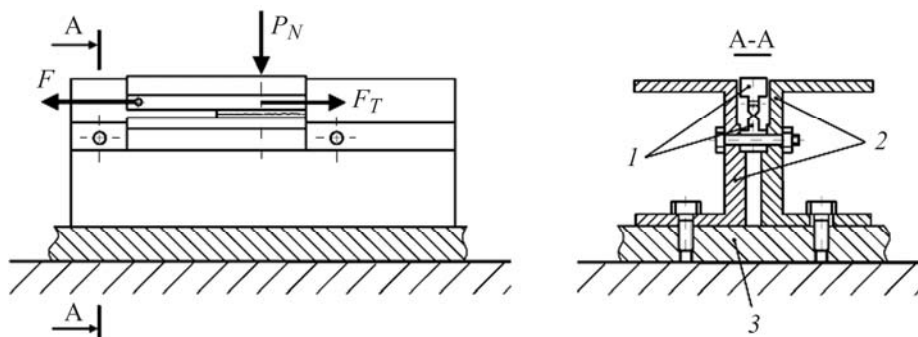


Рис. 3. Схема пристрою для визначення коефіцієнта ТБТ за поперечного зсуву балкового зразка: 1 – фрагменти зразка; 2 – захоплювачі; 3 – опорна плита.

Fig. 3. Scheme of the device for assessing the crack faces friction factor in I-beam specimen determined under Mode II fracture: 1 – fragments of specimen; 2 – grips; 3 – support plate.

Для аналітичного опису середніх ділянок КДВР, як і за руйнування нормальним відривом, використали степеневу залежність Періса [9, 10]:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (K_{II \max})^n, \quad (2)$$

де  $C$  і  $n$  – константи матеріалу.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Побудували КДВР без врахування ТБТ (рис. 4а) та з його врахуванням (рис. 4б), приймаючи під час обчислень  $K_{II \max}$ , що  $f_c = 0,84$ . Результати зіставлено з раніше отриманими [7] для сталі 65Г з сорбітною структурою (гартування з 820°C в оливу, відпуск при 600°C).

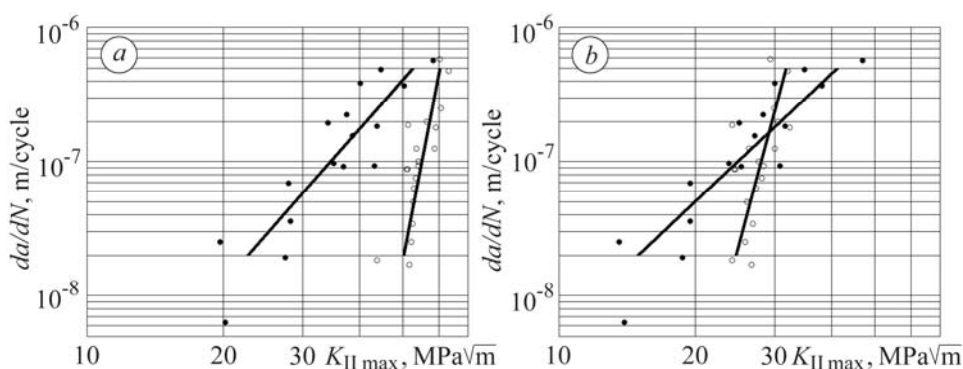


Рис. 4. КДВР сталі 65Г з трооститною (○) та сорбітною (●) структурами за поперечного зсуву ( $R = -1$ ) під час обчислень  $K_{II \max}$  без (а) та з врахуванням ТБТ (б).

Fig. 4. Fatigue crack growth rates curves of 65Г steel with trostite (○) and sorbite (●) structures under Mode II fracture ( $R = -1$ ) at  $K_{II \max}$  calculation without (a) and with account of crack faces friction (b).

За неврахування ТБТ (рис. 4а) трооститна структура за поперечного зсуву чинить більший опір РВТ, ніж сорбітна. На КДВР, побудованих з врахуванням ТБТ (рис. 4б), це збігається в діапазоні швидкостей РВТ  $da/dN = 10^{-8} \dots 10^{-7}$  m/cycle.

Така тенденція є протилежною до встановленої за випробувань в умовах нормального відриву [10]. Однак за швидкості РВТ  $da/dN = 2 \cdot 10^{-7}$  m/cycle відбувається інверсія, і трооститна структура чинить менший опір РВТ, ніж сорбітна, подібно як за нормального відриву [10].

Після аналітичного опису отриманих експериментальних результатів, використовуючи залежність (2), встановили характеристики тріщиностійкості  $K_{II \max}$  для трооститної та сорбітної структур сталі 65Г (див. таблицю).

#### Характеристики ЦТ сталі 65Г за поперечного зсуву

Структура сталі 65Г	$f_c$	Константи формули (2)		$K_{II \max}$ , МПа $\sqrt{m}$	
		$C$	$n$	$da/dN$ , m/cycle	
				$2 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Тростит	0 (гладкий контакт)	$2,02 \cdot 10^{-38}$	17,66	50	60
	0,84	$1,49 \cdot 10^{-25}$	12,39	24	31
Сорбіт	0 (гладкий контакт)	$1,81 \cdot 10^{-13}$	3,74	22	53
	0,48	$3,94 \cdot 10^{-12}$	3,15	15	42

Порівнюючи одержані числові результати, встановили, що ТБТ суттєво впливає на параметри середньої ділянки КДВР. Для трооститної структури сталі врахування ТБТ під час обчислень КІН  $K_{II \max}$  підвищує параметр  $C$  майже на 13 порядків та зменшує степеневий показник  $n$  на 30%, а для сорбітної – збільшує параметр  $C$  на порядок та зменшує степеневий показник  $n$  на 16%. Для трооститної структури за швидкості РВТ  $da/dN = 2 \cdot 10^{-8}$  m/cycle значення  $K_{II \max}$  зменшується на 52%, а за швидкості  $da/dN = 5 \cdot 10^{-7}$  m/cycle – на 48%. Для сорбітної структури  $K_{II \max}$  зменшується на 32% і 21%, відповідно.

#### ВИСНОВКИ

Тертя берегів тріщини за поперечного зсуву суттєво впливає на циклічну тріщиностійкість сталі 65Г. За швидкостей росту втомної тріщини  $da/dN = 10^{-8} \dots 10^{-7}$  m/cycle більший опір руйнуванню чинить трооститна структура сталі, ніж сорбітна, а за швидкостей, вищих за  $da/dN = 2 \cdot 10^{-7}$  m/cycle – навпаки, сорбітна.

*РЕЗЮМЕ.* Исследовано разрушение стали 65Г в условиях циклического нагружения поперечным сдвигом на балочных образцах с боковой трещиной. Экспериментально определен коэффициент трения берегов трещины в образцах из стали трооститной структуры и построены кинетические диаграммы усталостного разрушения. Установлено влияние трения берегов трещины на циклическую трещиностойкость стали 65Г в условиях поперечного сдвига для трооститной и сорбитной структур в зависимости от скорости роста усталостной трещины.

*SUMMARY.* Fracture of 65Г steel under cyclic Mode II loading of I-beam specimens with an edge crack is investigated. Crack faces friction factor for troostite structure of steel is experimentally determined and crack growth rate curves are plotted. The influence of crack faces friction on crack growth resistance of 65Г steel under Mode II fracture for troostite and sorbite structures versus fatigue crack growth rate is established.

1. *Механика разрушения и прочность материалов:* Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – Т. 2: Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами / М. П. Саврук. – К.: Наук. думка, 1988. – 620 с.
2. *Rail defects: an overview* / D. F. Cannon, K.-O. Edel, S. L. Grassie, K. Sawley // *Fatigue & Fracture of Engng Materials & Structures.* – 2003. – 26, № 10. – P. 865–886.

3. Дацишин О., Марченко Г. Про зсувні поверхневі тріщини в залізничних рейках // Механіка руйнування матеріалів та міцність конструкцій / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Львів: ФМІ НАНУ, 2014. – С. 379–384.
4. Murakami Y., Sakae C., and Hamada S. Mechanism of rolling contact fatigue and measurement of  $\Delta K_{IIth}$  for steels // Engng Against Fatigue / Ed. J. H. Beynon, M. W. Brown, T. C. Lindley et al. – Rotterdam: A. A. Balkema Publ., 1999. – P. 473–485.
5. Контактньо-втомна пошкоджуваність поверхні кочення залізничних коліс типу КП-2 та КП-Т / О. П. Осташ, І. М. Андрейко, В. В. Кулик, В. І. Прокопець // Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 39. – С. 118–122.
6. Експлуатаційна довговічність залізничних коліс із високоміцної сталі / В. В. Панасюк, О. П. Осташ, О. П. Дацишин та ін. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ, 2009. – С. 659–663.
7. 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. Штайюра // 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. Ivanyts'kyi, T. M. Lenkovs'kyi, V. M. Boiko, S. T. Shtayura // Materials Science. – 2014. – **49**, № 6. – P. 749–754.)
8. ГОСТ 10791-2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия. – Введ. 01.01.12.
9. Paris P. and Erdogan F. Critical analysis of crack propagation laws // J. of Basic Engng. – 1963. – **85**, № 4. – P. 528–533.
10. 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 20.05.2014