

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ СТАЛІ 17Г1С ЗА ПОПЕРЕЧНОГО ЗСУВУ

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ, С. Т. ШТАЮРА, Т. М. ЛЕНКОВСЬКИЙ, Ю. В. МОЛЬКОВ

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

Визначено статичну тріщиностійкість на компактних зразках Річарда зі сталі 17Г1С та встановлено критичне розкриття тріщини за поперечного зсуву. Випробувано зразки за циклічного навантаження, модернізовано зразок Річарда для поліпшення умов зародження і росту тріщини поперечного зсуву. Методом цифрової кореляції зображень отримано розподіл деформацій біля вершини концентратора.

Ключові слова: *компактний зразок Річарда, поперечний зсув, втомне руйнування, статичне та циклічне навантаження, тріщиностійкість, коефіцієнт інтенсивності напружень, розкриття, розподіл деформацій.*

Більшість деталей машин та механізмів у машинобудівній і хімічній галузях промисловості працюють за умов складного навантаження. Внаслідок цього в матеріалі виникає складний напружений стан, який за тривалої експлуатації змінює процес нагромадження пошкоджень та утворення тріщин в матеріалі порівняно з навантаженням за нормального відриву. Знакозмінні процеси пружно-пластичного деформування матеріалу, які відбуваються внаслідок довготривалих статичних чи циклічних навантажень, зумовлюють утворення тріщин. Незважаючи на статичну чи циклічну природу зародження, а також тип навантаження (відрив, зсув), тріщини знижують довговічність деталі чи елемента конструкції. За поодинокими в літературі даними про характеристики опірності руйнуванню поперечним зсувом, застосовуючи класичні підходи механіки руйнування, важко достовірно визначити залишкову міцність елементів конструкцій за складного навантаження. Щоб оцінити напружено-деформований стан матеріалу біля вершини тріщини, застосовують коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) за поперечного зсуву K_{II} . Руйнування матеріалу за зсувним механізмом має складну природу і досліджене недостатньо, тому процеси деформування та руйнування зсувом потребують аналізу і поглибленого дослідження.

Мета роботи – дослідити руйнування та визначити характеристики тріщиностійкості K_{II} сталі 17Г1С за поперечного зсуву.

Вибір експериментального зразка. Для дослідження руйнування поперечним зсувом використовують різні зразки та силові схеми їх навантаження [1–6], а саме: балковий, який навантажують зрізом [1], компактний з одним центральним [2, 3] або двома паралельно прорізаними концентраторами [4], півдисковий з нахиленим концентратором, навантажений триточковим згином [5], а також трубчастий з двома концентраторами, розташованими перпендикулярно до твірної циліндра, що скручується моментом [6, 7]. Кожен з цих зразків має свої особливості, пов'язані з наведенням гострої тріщини, спостереженням за вершиною концентратора, складною геометричною формою тощо. Оптимальним для експериментальних досліджень є компактний зразок, у якому прогнозований напрям поширення тріщини поперечного зсуву збігається з віссю прикладання навантажен-

ня [2, 3]. Він має просту геометричну форму, що дає змогу зменшити кількість технологічних операцій під час виготовлення, а симетричність кріплення зразка в навантажувальних тягах максимально наближує схему його навантаження до модельної.

Визначення статичної тріщиностійкості сталі 17Г1С. Для досліджень вибрали зразок Річарда [2] шириною $w = 80$ mm та товщиною B (5; 8 mm) (рис. 1). Виготовили серію зразків зі сталі 17Г1С хімічного складу: 0,17% С; 0,69% Si; 0,63% Mn; 0,06% Ni; $\leq 0,04\%$ S; 0,02% Cr; 0,08% Cu; $\leq 0,035\%$ P; $\leq 0,008\%$ N; $\leq 0,08\%$ As. Механічні характеристики сталі 17Г1С ($\sigma_{0,2} = 240$ МПа; $\sigma_B = 520$ МПа; $\delta = 33\%$; $\psi = 62\%$) визначали на плоских зразках товщиною $t = 5$ mm за відповідним стандартом [8]. Надріз з V-подібним концентратором у зразку Річарда виконували у площині, яка збігається з напрямком шарів вальцювання у ферито-перлітній структурі матеріалу (рис. 2), яку досліджували на металографічному мікроскопі МИМ-6 на повздовжніх мікрошліфах, травлених 4%-им розчином азотної кислоти в ізоаміловому спирті.

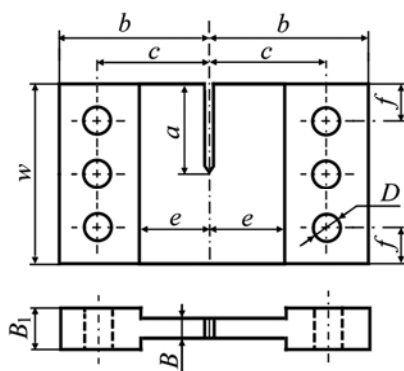


Рис. 1. Fig. 1.

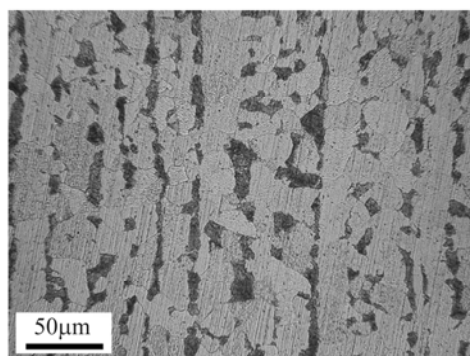


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 1. Компактний зразок Річарда:

$$a = 0,5w; b = 0,85w; c = 0,6w; e = 0,35w; f = 0,2w; D = 0,15w; B_1 = 0,2w.$$

Fig. 1. Richard's compact specimen

$$a = 0.5w; b = 0.85w; c = 0.6w; e = 0.35w; f = 0.2w; D = 0.15w; B_1 = 0.2w.$$

Рис. 2. Ферито-перлітна структура сталі 17Г1С.

Fig. 2. Ferritic-pearlitic structure of 17Г1С steel.

Утворювали втомну тріщини на продовженні концентратора за силовою схемою нормального відриву (рис. 3a) у лабораторних умовах за температури $T = 20^\circ\text{C}$ на випробувальній машині EUS-20 з гідравлічним приводом за асиметрії циклу навантаження $R = 0,2$ та частотою $\nu = 12$ Hz, керуючись стандартом [9].

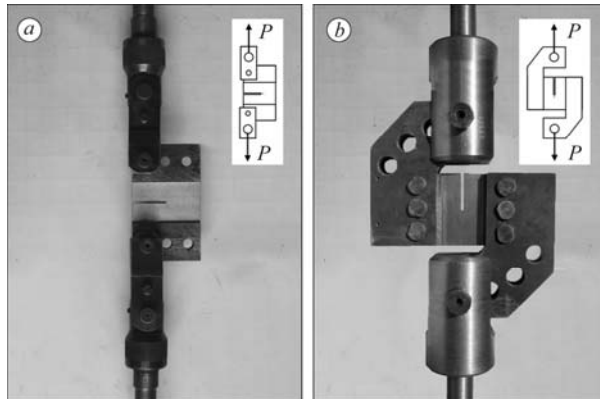
Щоб визначити КІН K_{CII} , зразок з тріщиною випробовували за схемою поперечного зсуву (рис. 3b) зі швидкістю навантаження 500 kg/min. Зсув берегів тріщини δ_{CII} вимірювали тензOMETричним давачем переміщень, встановленим на продовженні концентратора на віддалі 3 mm до вершини тріщини. Реєстрували сигнали давача та динамометра машини, використовуючи аналого-цифровий перетворювач Е-440 з програмним забезпеченням PowerGraf 3.3.6, і відображали їх на моніторі персонального комп'ютера. Процес деформування зразка записували на діаграмі "зусилля P -зсув у вершині тріщини U " (рис. 4). З діаграми визначали критичне переміщення $U = U_C$ і деформаційну характеристику тріщиностійкості $\delta_{CII} \approx U_C$, а також зусилля старту тріщини $P = P_{C2}$, за яким, використовуючи відому аналітичну формулу [3], обчислювали $K_{II} = K_{CII}$:

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{\pi a}}{wB} \cdot \sqrt{\frac{-0,23 + 1,40\left(\frac{a}{w-a}\right)}{1 - 0,67\left(\frac{a}{w-a}\right) + 2,08\left(\frac{a}{w-a}\right)^2}}$$

де P – зовнішнє навантаження; a – абсолютна довжина тріщини; w – ширина зразка; B – товщина робочої частини.

Рис. 3. Силова схема навантаження зразка за нормального відриву (а) та поперечного зсуву (b).

Fig. 3. Loading chart of the specimen under mode I (a) and mode II (b) fracture.



В результаті досліджень встановили, що КІН K_{CII} для зразків зі сталі 17Г1С становить $40 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, що є близьким до значення, отриманого на трубчастих зразках зі сталі 20 ($37 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$) [7], яка є структурно подібна до досліджуваної сталі. Розкриття зсуву становить $\delta_{CII} = 1,53 \text{ мм}$. Також слід зазначити, що за критичного зусилля P_{C2} тріщина стартує за механізмом поперечного зсуву, однак за подальшого навантаження зразка її напрям відхиляється від напрямку осевого навантаження.

Дослідження втомного руйнування за поперечного зсуву. Вивчали втомне руйнування зразків, навантажених за схемою поперечного зсуву

(рис. 3a) для реалізації стабільного підростання тріщини зсуву та визначення характеристик циклічної тріщинозміцності (ЦТ) ΔK_{IIth} ; ΔK_{II-2} ; ΔK_{II-3} та ΔK_{IIsc} . Зразки циклічно навантажували за режимами такими, як для нормального відриву [10].

Випробувавши серію зразків зі сталі 17Г1С, встановили, що у вершині концентратора не утворюється тріщина поперечного зсуву, а одна або декілька тріщин змішаного типу (відрив + поперечний зсув) з можливим подальшим галузженням. Причиною утворення тріщин за мішаним механізмом є нормальні напруження в матеріалі біля вершини концентратора. Щоб зменшити їх вплив, оптимізували експериментальний зразок та удосконалили схему його навантаження.

У модернізованому зразку (рис. 5a) зменшили ширину робочої частини, що дало змогу наблизити точки прикладання зусилля до площини концентратора і збільшити жорсткість зразка. Зменшення кількості отворів та збільшення їх діаметра для закріплення у навантажувальних захватах знижує імовірність виникнення люфтів та зазорів. Прорізаний ювелірною пилкою концентратор шириною

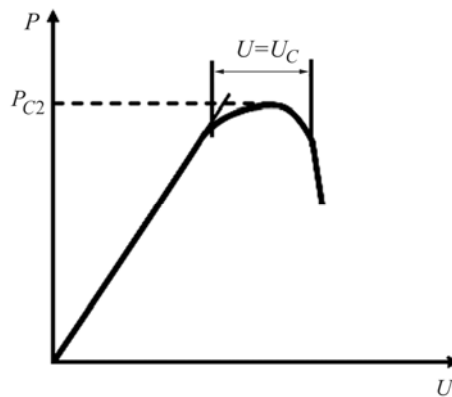


Рис. 4. Схематична діаграма деформування зразка за поперечного зсуву.

Fig. 4. Schematic deformation diagram under mode II fracture.

0,2 mm закінчується радіусом заокруглення $r = 0,15$ mm у вершині. У навантажувальних захватах замінено рухоме шарнірне з'єднання з перехідними тягами випробувальної машини на нерухоме, де захвати жорстко з'єднані з пластинами для навантаження (рис. 5). Досліджували модернізовані зразки за режимів таких, як для зразка Річарда.

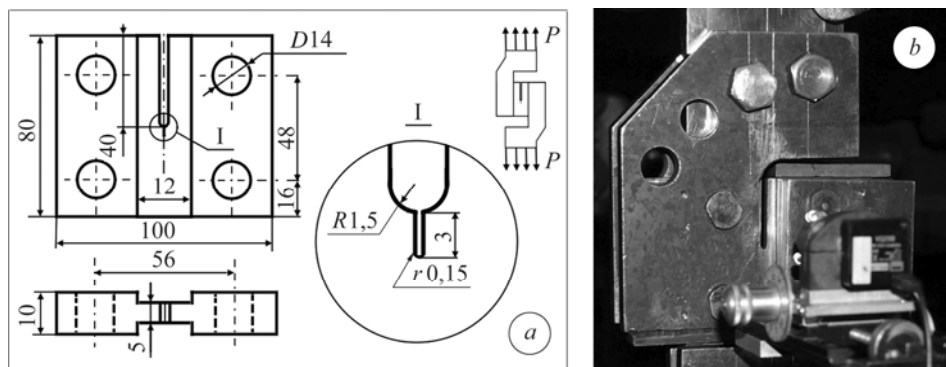


Рис. 5. Схема модернізованого зразка для дослідження втомного руйнування поперечним зсувом (а) та пристосування з відеокамерою для захвату зображення ділянки біля вершини концентратора (b).

Fig. 5. A chart of a modernized specimen for fatigue fracture investigation under mode II loading (a) and a device with CCD-camera for notch tip zone images capturing (b).

За результатами експериментів встановлено, що біля вершини концентратора відбувається зародження та ріст тріщин змішаного типу з відхиленням від напрямку прикладання зовнішнього зусилля як у зразку Річарда.

Визначення деформацій методом цифрової кореляції зображень. Розподіл деформацій біля вершини концентратора визначали методом цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) [11–15], щоб оцінити процес зародження та росту тріщини. Для цього фотографували ділянки поверхні зразка перед вершиною тріщини розміром 6×4 mm відеокамерою, обладнаною об'єктивом для макрозйомки і закріпленою безпосередньо до досліджуваного зразка (рис. 5b). Зображення, отримані за відомих навантажень, використовували для обробки методом ЦКЗ, який ґрунтується на їх цифровій обробці за відповідним алгоритмом. Алгоритм полягає у розбитті кожного цифрового зображення на фрагменти певного розміру, які є базою вимірювання деформацій, і визначенні на кожному з цих фрагментів піка інтенсивності світла. За зміною координат піків відповідних фрагментів на кожному наступному зображенні стосовно попереднього визначають взаємне переміщення поверхонь у межах фрагмента, а з відношення переміщення до розміру фрагмента, встановлюють значення деформації. Для отримання зображень використовували оптичну систему відеокамери моделі VQ-29B роздільною здатністю 720×576 pixels з мікроскопічним об'єктивом $4 \times 0,1$. За вказаних характеристик оптичної системи мінімальна база вимірювання деформацій становила 0,1 mm.

В результаті отримали розподіли двох компонентів деформації ϵ_{xx} та ϵ_{yy} за максимального навантаження циклу на вказаній ділянці поверхні зразка (рис. 6). Як бачимо, на продовженні концентратора зона максимальних деформацій відсутня. Вона зосереджена у смугах, що виходять з вершини концентратора під кутом $\sim 27^\circ$ до лінії прикладання навантаження.

Такий розподіл деформацій біля вершини концентратора свідчить про неможливість утворення тріщини на його продовженні, оскільки деформації в цьому напрямку є незначні. Як показали дослідження, тріщина завжди зароджується в зоні максимальних розтягувальних деформацій ϵ_{yy} (рис. 6b).

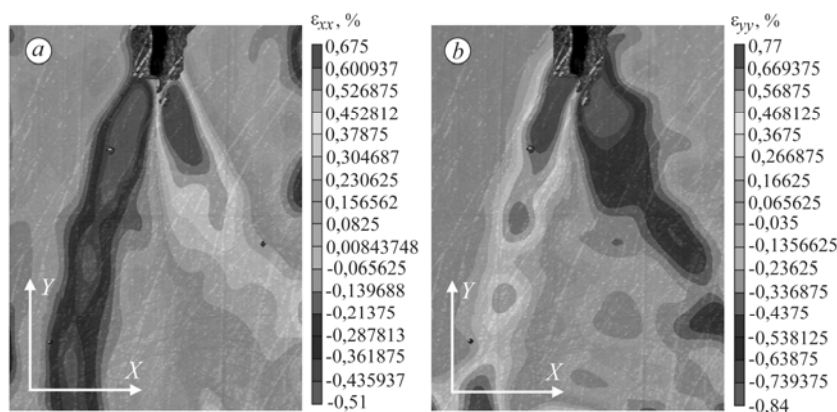


Рис. 6. Розподіл деформацій біля вершини концентратора по осях абсцис x (a) та ординат y (b) за максимального навантаження циклу.

Fig. 6. Deformation distribution at the notch tip along x (a) and y axes (b) under maximum loading of a cycle.

Дослідження втомного руйнування модернізованого зразка з канавкою.

Для концентрації напружень в осьовому напрямку на продовженні концентратора, що закінчувався несиметричним шевроном, з одного боку зразка виконали вузьку U-подібну канавку шириною 1 mm. Під час циклічних випробувань з боку плоскої поверхні виявили зародження та підростання тріщини змішаного типу до довжини 3 mm, зі сторони U-подібної канавки тріщин не виявили. Після подальшого циклічного навантаження упродовж 45 тис. циклів тріщина виросла до 4 mm, після чого її ріст припинився. Після поступового збільшення максимального P_{\max} та мінімального P_{\min} навантаження циклу в 1,5 рази тріщина не підросла. Проте зі збільшенням навантаження у 2 рази відбулося спонтанне руйнування зразка за механізмом поперечного зсуву. На зламі зразка (рис. 7) видно ділянку підростання тріщини змішаного типу, яка поширювалася у шевроні, а також поверхню, утворену руйнуванням за механізмом поперечного зсуву.

Рис. 7. Злам зразка, отриманий за циклічних випробувань поперечним зсувом: 1 – сторона плоскої поверхні; 2 – сторона поверхні з канавкою; 3 – поверхня тріщини поперечного зсуву; 4 – поверхня тріщини змішаного типу.

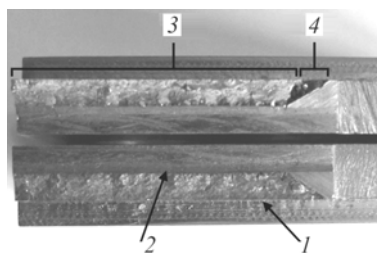


Fig. 7. Fracture of the specimen under cyclic mode II loading: 1 – plane side; 2 – grooved side; 3 – mode II crack surface; 4 – mixed mode crack surface.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що зразки зі сталі 17Г1С мають статичну тріщиностійкість за поперечного зсуву $40 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$. Критичне розкриття вершини тріщини за поперечного зсуву становить 1,53 mm.

Визначити характеристики ЦТ конструкційних сталей на зразку Річарда та модернізованому зразку за поперечного зсуву є важко, оскільки за циклічного навантаження у концентраторі відбувається зародження, ріст та галуження тріщин мішаного макромеханізму. Розподіли двох компонентів деформації ϵ_{xx} та ϵ_{yy} біля вершини концентратора модернізованого зразка свідчать про те, що втомна тріщина зароджується в напрямку максимальних напружень, що не збігається з напрямком прикладання зовнішнього навантаження. Очевидно, що за такої схеми

та режимів навантаження поріг $\Delta K_{(I+II)th}$ набуває менших значень на кінетичній діаграмі втомного руйнування, ніж поріг ΔK_{IIth} .

Показано, що виготовлення U-подібної канавки на продовженні концентратора змінює напружено-деформований стан матеріалу і спричиняє його руйнування за циклічних навантажень за механізмом поперечного зсуву в напрямку максимальних зсувних напружень. Однак стабільного підростання втомної тріщини поперечного зсуву досягнути не вдалося, що вимагає подальшого глибокого аналізу силових схем, зразків та режимів навантаження.

РЕЗЮМЕ. Определено статическую трещиностойкость на компактных образцах Ричарда из стали 17Г1С и установлено критическое раскрытие трещины при поперечном сдвиге. Испытано образцы циклическим нагружением, модернизировано образец Ричарда с целью улучшения условий зарождения и роста трещины поперечного сдвига. Методом цифровой корреляции изображений получено распределение деформаций возле вершины концентратора.

SUMMARY. The static crack growth resistance and the critical crack opening displacement on compact Richard's specimens made of 17Г1С steel in longitudinal shear (mode II) are determined. Specimens were tested under cyclic loading. The Richard's specimen was modernized with the purpose to improve the conditions for shear cracks initiation and growth. Using the digital image correlation method the deformation distribution near the notch tip was obtained.

1. Tsangarakis N. Mode II fracture toughness of 4340 steel // Engng. Fract. Mech. – 1985. – 22, № 4. – P. 617–624.
2. Richard H. A. A new compact shear specimen // Int. J. of Fract. – 1981. – 17, № 5. – P.105–107.
3. Biner S. B. Fatigue crack growth studies under mixed-mode loading // Ibid. – 2001. – 23. – P. 259–263.
4. Jones D. L., and Chisholm D. B. An investigation of the edge-sliding mode in fracture mechanics // Engng. Fract. Mech. – 1975. – 7. – P. 261–270.
5. Ayatollahi M. R., and Aliha M. R. M. On determination of mode II fracture toughness using semi-circular bend specimen // Int. J. of Solids and Struct. – 2006. – 43, № 17. – P. 5217–5227.
6. Авт. св. СССР № 135996. МКИ 4001 N 3/00. Образец для определения характеристик трещиностойкости материалов при поперечном сдвиге / А. Е. Андрейкив, Я. Л. Иваницький, В. А. Зазуляк и др. – Оупбл. 08.07.88; Бюл. №41.
7. Штатора С. Т., Костів Р. Б., Ленковський Т. М. Вплив водню на міцність матеріалів за різних макромеханізмів поширення тріщини // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. В 2-х т. – 2010. – Т. 1. – С. 129–133.
8. ГОСТ 1497-84 /СТ СЭВ 471-77. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 40 с.
9. ГОСТ 25506-85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 61 с.
10. Методические указания. Методы механических испытаний металлов, определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении. – М.: Международный центр научной и технической информации, 1993. – 53 с.
11. Chu T., Ranson W., and Sutton M. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics // Experimental Mechanics. – 1985. – 25 (3). – P. 232–244.
12. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis / M. A. Sutton, M. Cheng, W. H. Peters et al. // Image and Vision Computing. – 1986. – 4, № 3. – P. 143–150.
13. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review / B. Pan, K. M. Qian, H. M. Xie, and A. Asundi // Measurement Science & Technology. – 2009. – 20(6). – P. 062001–062007.
14. Wang Z. On the accuracy and speed enhancement of digital image correlation technique // J. of Experimental Mechanics. – 2011. – 26, № 5. – P. 632–638.
15. Accuracy enhancement of digital image correlation with B-spline interpolation / L. Luu, Z. Wang, M. Hoang, et al. // Optics Letters. – 2011. – 36, №16. – P. 3070–3072.

Одержано 11.12.2012