

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

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

Запропоновано конструкцію зразка для дослідження втомного руйнування сталей за поперечного зсуву. З використанням методу скінченних елементів отримано формулу для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень з урахуванням тертя берегів тріщини. Розроблено методику побудови кінетичних діаграм втомного руйнування (КДВР) за поперечного зсуву та апробовано її на зразках з конструкційної сталі 65Г. Побудовано КДВР та апроксимовано її середню ділянку лінійною залежністю за встановленими параметрами.

Ключові слова: двотавровий зразок, консольний згин, поперечний зсув, втомне руйнування, метод скінченних елементів, коефіцієнт інтенсивності напружень, коефіцієнт тертя берегів тріщини, кінетична діаграма втомного руйнування.

Оцінювати довговічність елементів конструкцій з гострими концентраторами, які працюють за умов зсувних напружень, необхідно на основі підходів механіки втомного руйнування матеріалів за поперечного зсуву. Тому важливим є розроблення методичних рекомендацій для достовірного визначення характеристик циклічної тріщиностійкості (ЦТ) матеріалів за поперечного зсуву.

Щоб оцінити втомне руйнування металевих матеріалів за нормального відриву, стандартизували методи визначення характеристик ЦТ [1]. Відомі [2–5] деякі експериментальні дослідження втомного руйнування сталей поперечним зсувом, які базуються на моделях, що не враховують стабільного підростання втомної тріщини чи тертя її берегів. Це негативно впливає на аналіз напружено-деформованого стану (НДС) біля вершини тріщини та визначення характеристик ЦТ матеріалу, а також на оцінку довговічності елементів конструкцій загалом, що необхідно враховувати під час розроблення методики побудови кінетичних діаграм втомного руйнування (КДВР) за поперечного зсуву.

Мета роботи – розробити методику побудови КДВР та визначення характеристик ЦТ сталей за поперечного зсуву з урахуванням тертя берегів тріщини.

Зразок, обладнання та методика втомних випробувань поперечним зсувом. На основі аналізу літературних даних та власних досліджень розробили спеціальний зразок (рис. 1) для вивчення втомного руйнування поперечним зсувом [6]. Зразок у вигляді двотаврової балки має захватну і робочу частини. Остання має дві полицки, що з'єднані між собою стінкою. Посередині стінки у повздовжньому напрямку паралельно до полицок прорізано паз, який закінчується шевронним надрізом, а на його продовженні виконано бокові V-подібні канавки, в яких росте тріщина. Потовщена частина зразка прямокутного перерізу служить для кріплення його в захоплювач установки.

З аналізу НДС двотаврової балки за консольного згину поперечною силою, прикладеною в площині стінки [7] впливає, що максимальні зсувні напруження

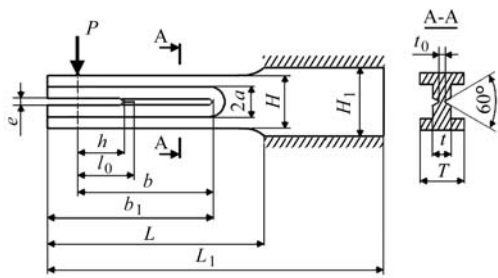


Рис. 1. Зразок для утворення втомної тріщини поперечним зсувом за консольного згину:
 $t = 0,33T$; $t_0 = 0,11T$; $b = 7,5T$; $b_1 = 1,22b$;
 $L = 1,53b$; $L_1 = 2,5b$; $h = 0,35b$; $H = 2,9T$;
 $2a = 0,57H$; $e = 0,05H$.

Fig. 1. Specimen for fatigue mode II crack formation under consoling bending:
 $t = 0.33T$; $t_0 = 0.11T$; $b = 7.5T$; $b_1 = 1.22b$;
 $L = 1.53b$; $L_1 = 2.5b$; $h = 0.35b$; $H = 2.9T$;
 $2a = 0.57H$; $e = 0.05H$.

асиметрією $R = -1$.

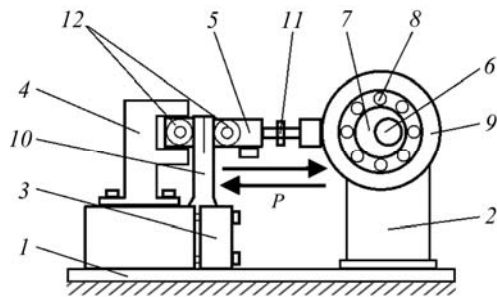


Рис. 2. Конструктивна схема установки для випробувань циклічним навантаженням за умов поперечного зсуву:
1 – опорна плита; 2 – підшипникова опора; 3 – захоплювач зразка;
4 – фіксатор; 5 – динамометрична тяга; 6 – вал підшипникової опори; 7 – змінний ексцентрик; 8, 12 – підшипники;
9 – шатун; 10 – зразок;
11 – різьбова шпилька.

Установка складається з опорної плити 1, на якій встановлено підшипникову опору 2 з приводом від електродвигуна, захоплювач зразка 3 та фіксатор 4 динамометричної тяги 5. На валу 6 підшипникової опори для регулювання амплітуди навантажень встановлено змінний ексцентрик 7, який через підшипник 8 з'єднаний з шатуном 9. Шатун через динамометричну тягу передає коливні рухи від ексцентрика на вільний кінець зразка 10. Довжину динамометричної тяги регулюють різьбовою шпилькою 11. Навантажують зразок із заданою асиметрією циклу через підшипники 12. Змінюючи положення втулок ексцентрика, задають амплітуду навантаження зразка. Силу, прикладену до нього, контролюють динамометричною тягою з тензомостом, сигнал від якого через аналого-цифровий перетворювач Е-440 передається на персональний комп'ютер (ПК). Частота навантаження зразка 12Hz. Довжину підростаючої втомної тріщини поперечного зсуву вимірюють катетометром В-630.

Аналіз напружено-деформованого стану методом скінченних елементів.
Для аналізу НДС за поперечного зсуву запропонували тривимірну (3D) модель робочої частини зразка ($b = 72 \text{ mm}$; $T = 9,6 \text{ mm}$), яка враховує геометрію концент-

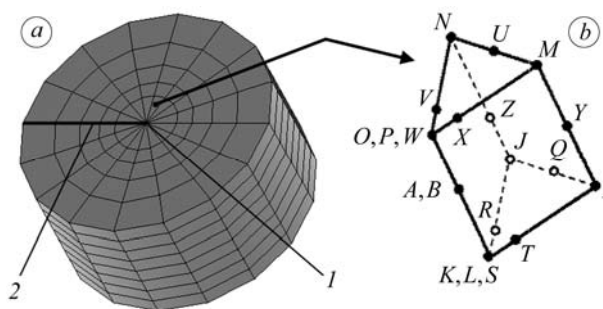
винають уздовж повздожньої осі. Нормальні напруження у площині тріщини дорівнюють нулю. Знакозмінні зсувні напруження під час реверсивного навантаження двотаврової балки з осовою тріщиною будуть формувати в зоні концентратора зону передруйнування, а відтак, зумовлять ріст втомної тріщини. V-подібні канавки у зразку підвищують концентрацію дотичних напружень, що сприяє росту тріщини в початковій площині.

Для випробування зразків сконструювали та виготовили установку [8] (рис. 2), яка забезпечує симетричний цикл навантаження зразка за синусоїдальним законом з

раторів. Обчислювали коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) за допомогою методу скінченних елементів. Під час розбиття моделі на скінченні елементи використали двадцятивузлові тривимірні елементи, що здебільшого мали форму паралелепіпедів (рис. 3а). Щоб досягти вищої точності обчислень, елементи, які мають спільні грані з фронтом тріщини, модифікували. Тому розбиття на скінченні елементи виконано так, що вершину тріщини оточують призматичні скінченні елементи (рис. 3б). Вони утворюються злиттям вузлів (Q, P, W), (K, L, S) та (A, B) в один. При цьому серединні вузли на сторонах SI, SJ, WM, WN елементів повинні бути зсувнуті на чверть відповідної сторони в напрямку до фронту тріщини [9]. Тобто: $ST = SI/4, SR = SJ/4, WX = WM/4, WV = WN$.

Рис. 3. Моделювання навколо фронту тріщини (а) та схема розташування вузлів у модифікованих елементах (б): 1 – вершина тріщини; 2 – площина тріщини.

Fig. 3. Space modeling around the crack front (a) and scheme of nodes location in modified elements (b): 1 – crack tip; 2 – crack plane.



Визначали КІН K_{II} з врахуванням контакту та тертя берегів тріщини за умов плоскої деформації. За модельний приймали матеріал з модулем Юнга $E = 2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ та коефіцієнтом Пуассона $\nu = 0,3$. Після статичного навантаження моделі одиначною силою обчислювали КІН K_{II} , виходячи з переміщень розрахункових вузлів [10]. Таким чином, отримали значення безрозмірного КІН K_{II} для різних коефіцієнтів тертя берегів тріщини в діапазоні $0 \leq f_c \leq 0,9$.

За результатами розрахунків одержали масив даних. На основі них за допомогою методу найменших квадратів побудували формулу для визначення КІН K_{II} для діапазону відносних довжин тріщини $0,4 \leq (l_0/b) \leq 0,8$:

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{b}}{Ht_0} \left[-0,373 + (5,699 - 3,799f_c - 0,034f_c^2) \cdot \left(\frac{l_0}{b}\right) - (1,490 - 2,681f_c) \cdot \left(\frac{l_0}{b}\right)^2 \right],$$

де P – навантаження; b та H – довжина та висота робочої частини зразка, відповідно; t_0 – товщина робочого перерізу зразка; l_0 – загальна довжина тріщини; f_c – коефіцієнт тертя берегів тріщини.

Методика експерименту. Експериментальний зразок захватною частиною встановлюють у захоплювач вертикально та затискають болтами. Динамометричну тягу одягають на вільний кінець зразка. Після цього встановлюють ексцентрик у нульове положення та затягують контргвинт у верхній частині фіксатора динамометричної тяги, що обмежує її рух у вертикальному напрямі. Далі контрольними гайками і різьбовою тягою підводять навантажувальні підшипники до контакту з полчками зразка, зберігаючи нейтральне вертикальне положення зразка. Регулюючи кут повороту ексцентрика та закрут різьбової шпильки, встановлюють амплітуду навантаження за симетричним знакозмінним циклом, яку реєструють на ПК. Внаслідок навантаження в нетто-перерізі зразка виникають зсувні напруження, які повинні задовольняти умову: $\tau_{\max} = 0,5\tau_{0,3}$, де $\tau_{0,3}$ – границя текучості матеріалу на зріз.

За вибраним режимом навантаження наводять початкову тріщину довжини $l_0/b = 0,4$. Після цього зусилля змінюють так, щоб забезпечити швидкість росту тріщини $10^{-10} \dots 10^{-5} \text{ m/cycle}$. Приріст тріщини заміряють кожні 5...10 тис. циклів.

Досліджуючи втомне руйнування матеріалу за поперечного зсуву, послідовно вимірюють приріст довжини тріщини і кількість циклів навантаження за заданих параметрів циклу і частоти. Під час експерименту реєстрували навантаження зразка P , кількість циклів навантажень N та довжину втомної тріщини l . Швидкість поширення тріщини V обчислювали так: $V = \Delta l_i / \Delta N_i$, де Δl_i – приріст довжини тріщини за ΔN_i циклів навантаження. Максимальний КІН циклу $K_{II\max}$, що відповідає P_{\max} , обчислювали за вищенаведеною формулою.

За результатами експериментальних досліджень будували залежність приросту довжини тріщини від кількості циклів навантаження. Швидкість росту тріщини розраховували як середній приріст її довжини за один цикл за заданих умов навантаження. КДВР будували у вигляді залежності швидкості росту тріщини V від максимального КІН циклу $K_{II\max}$, з якої визначали характеристики циклічної тріщиностійкості матеріалу.

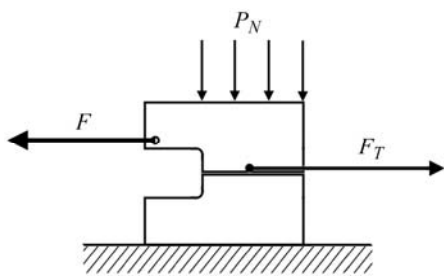


Рис. 4. Схема визначення коефіцієнта тертя берегів тріщини за поперечного зсуву.

Fig. 4. Scheme of the crack edges friction coefficient determination under transversal shear.

$= F/P_N$, де F – зусилля зсуву; P_N – зусилля притиску.

Результати досліджень та їх аналіз. Використовуючи запропоновану методику побудови КДВР, отримали множину точок для конструкційної сталі 65Г (гартування з 820°C в оливу, відпуск за 600°C), побудували діаграму та апроксимували її прямолінійну ділянку рівнянням Періса (рис. 5). Визначений емпірично коефіцієнт тертя берегів тріщини становить $f_c = 0,48$. Щоб оцінити вплив тертя берегів тріщини на КІН, показали також середню ділянку діаграми без врахування тертя. Порівнюючи отримані діаграми, встановили, що для досліджуваного матеріалу за тертя берегів тріщини прямолінійна ділянка діаграми зміщується вліво по осі абсцис та знижується значення $K_{II\max}$ на 20...32%.

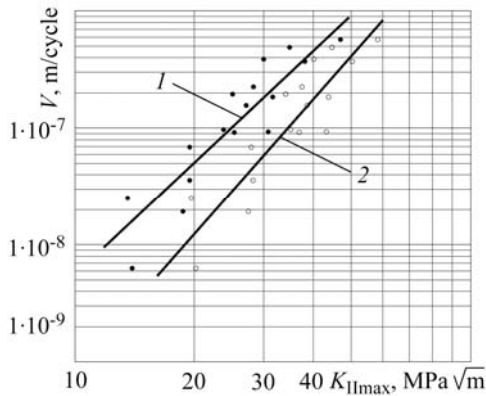


Рис. 5. Ділянка КДВР сталі 65Г за поперечного зсуву ($R = -1$) з врахуванням тертя берегів тріщини ($f_c = 0,48$) (1) та без нього (2).

Fig. 5. Section of the crack growth rates curve of steel 65Г under transversal shear ($R = -1$) with account of crack edges friction ($f_c = 0.48$) (1) and without it (2).

Аналізуючи середню ділянку діаграми з врахуванням тертя, встановили, що за $K_{I\max} = 20 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ швидкість поширення тріщини за поперечного зсуву становить $5 \cdot 10^{-8} \text{ м/cycle}$, а за $K_{I\max} = 50 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ – $9 \cdot 10^{-7} \text{ м/cycle}$. В свою чергу, за швидкості поширення втомної тріщини 10^{-7} м/cycle , що відповідає середній точці прямолінійної ділянки діаграми ($K_{I\max}^*$) КІН за поперечного зсуву становить $25 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Застосувавши до прямолінійної ділянки діаграми аналог рівняння Періса, отримуємо параметри нахилу прямої $n = 3,154$ та її положення відносно осі абсцис $C = 3,935 \cdot 10^{-12}$. Тоді загальне рівняння росту втомної тріщини на середній ділянці КДВР набуває вигляду: $V = 3,935 \cdot 10^{-12} \cdot (K_{I\max})^{3,154}$.

ВИСНОВКИ

Розроблено методику побудови КДВР сталей за поперечного зсуву з врахуванням тертя берегів тріщини та визначено характеристики тріщиностійкості n і $K_{I\max}^*$.

Визначено коефіцієнт тертя берегів тріщини сталі 65Г (гартування з 820°C в оливу, відпуск за 600°C) та показано вплив тертя берегів тріщини на $K_{I\max}$ на середній ділянці КДВР.

РЕЗЮМЕ. Предложено конструкцию образца для исследования усталостного разрушения сталей при поперечном сдвиге. С использованием метода конечных элементов получено формулу для определения коэффициента интенсивности напряжений с учетом трения берегов трещины. Разработано методику построения кинетических диаграмм усталостного разрушения (КДУР) при поперечном сдвиге и апробировано ее на образцах из конструкционной стали 65Г. Построено КДУР и аппроксимировано ее срединный участок линейной зависимостью за установленными параметрами.

SUMMARY. A specimen for fatigue testing of steels under transversal shear is presented. The formula for the stress intensity factor determination, taking into account the crack edges friction using the finite elements method is obtained. The method for plotting the fatigue crack growth rates curves under transversal shear is developed and it is proved for 65Г steel specimens. The fatigue crack growth rate curve is plotted and its linear section is approximated.

1. *Методы* механических испытаний металлов, определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении // Методические указания. – М.: 1993. – 53 с.
2. *Bold P. E., Brown M. W., and Allen R. J.* Shear mode crack growth and rolling contact fatigue // *Wear*. – 1991. – **144**, № 1–2. – P. 307–317.
3. *Fatigue crack growth under mode II loading* / M. O. Wang, R. H. Hu, C. F. Qian and J. C. M. Li // *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* – 1995. – **18**, № 12. – P. 1443–1454.
4. *Murakami Y., Hamada S.* A new method for measurement of mode II fatigue threshold stress intensity factor range ΔK_{IIth} // *Ibid.* – 1997. – **20**, № 6. – P. 863–870.
5. *Визначення* характеристик тріщиностійкості сталі 17Г1С за поперечного зсуву / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, Т. М. Ленковський, Ю. В. Мольков // *Фіз.-хім механіка матеріалів*. – 2013. – **49**, № 5. – С. 73–78.
6. *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. – Опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20.
7. *Александров А. В., Потапов В. Д., Державин Б. П.* Сопротивление материалов. – М.: Высш. шк., 2003. – 560 с.
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. – Опубл. 10.10.2012, Бюл. № 19.
9. *Barsoum Roshdy S.* On the use of isoparametric finite elements in linear fracture mechanics // *Int. J. for Numerical Methods in Engng.* – 1976. – **10**, № 1. – P. 25–37.
10. *Механика* разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – Т. 1: Основы механики разрушения материалов / В. В. Панасюк, Е. О. Андрейків, В. З. Партон. – К.: Наук. думка, 1988. – 488 с.

Одержано 18.10.2013