

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗОНИ ПЕРЕДРУЙНУВАННЯ ЗА ДВОВІСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПЛАСТИНИ З ЦЕНТРАЛЬНОЮ ТРІЩИНОЮ

YUANLI DU¹, Ю. В. МОЛЬКОВ², Т. М. ЛЕНКОВСЬКИЙ², Р. А. КОВАЛЬЧУК³

¹ Hubei University of Technology, Wuhan, China;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

³ Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

Виконано порівняння розподілів деформацій у зоні передруйнування хрестоподібних зразків за двовісного навантаження, одержаних методами скінченних елементів і цифрової кореляції зображень. Показано, що використання істинної діаграми деформування в алгоритмі розрахунку методом скінченних елементів забезпечує коректність числових розв'язків. Встановлено вплив двовісного навантаження та отримано добру збіжність розрахункових і експериментальних результатів визначення локальних деформацій в околі вершини тріщини.

Ключові слова: двовісне навантаження, метод скінченних елементів, істинна діаграма деформування, цифрова кореляція зображень, розподіл деформацій, локальна деформація, зона передруйнування.

Теоретичний аналіз напружено-деформованого стану (НДС) елементів конструкцій за двовісного навантаження і значних пластичних деформацій досить складний через нелінійний характер деформування в околі концентраторів напружень. Тому його здійснюють, зазвичай, шляхом комп'ютерного моделювання із застосуванням методу скінченних елементів (МСЕ) [1–3]. Цей метод широко застосовують як в інженерній практиці, так і для розв'язування фундаментальних задач механіки матеріалів. Коректність розрахунків МСЕ залежить від точності відтворення в моделі геометричної форми та схеми навантаження реального елемента конструкції чи зразка, розбиття моделі на скінченні елементи і закладених у алгоритм розрахунку механічних характеристик матеріалу. Здебільшого програмні комплекси МСЕ містять бази даних механічних характеристик конструкційних матеріалів, визначених за стандартною методикою. Однак для точного аналізу НДС конструкцій з пружно-пластичних матеріалів за дії зовнішніх навантажень, близьких до критичних (руйнуючих), доцільно використовувати у алгоритмі розрахунку графік залежності деформацій від істинних напружень, тобто істинну діаграму деформування [4]. Нижче для експериментальної перевірки результатів, отриманих МСЕ, використано безконтактний оптико-цифровий метод вимірювання поверхневих переміщень – цифрову кореляцію зображень (ЦКЗ) [5, 6]. Цей метод дає можливість отримати поля розподілу переміщень і деформацій на поверхні об'єкта дослідження, які можна порівнювати з аналогічними полями, одержаними МСЕ. В основу експериментальних і теоретичних досліджень покладено силові схеми одно- та двовісного навантажень пластини з центральною втомною тріщиною. Вибір таких силових схем зумовлений тим, що вони імітують роботу магістральних нафтопроводів, посудин тиску, паливних баків ракет-носіїв тощо.

Контактна особа: Ю. В. МОЛЬКОВ, e-mail: yumolk@gmail.com

Мета роботи – експериментальна перевірка результатів визначення параметрів НДС пластини з центральною тріщиною за двовісного навантаження, одержаних за допомогою МСЕ.

Обладнання та методика досліджень. Схема двовісного навантаження реалізується на хрестоподібному зразку з центральною тріщиною (рис. 1) за розтягу зусиллям P_1 , прикладеним перпендикулярно до тріщини, і зусиллям P_2 , прикладеним вздовж лінії тріщини. Зразки виготовляли із листової сталі 65Г ($t = 2$ mm) в стані постачання так, щоб напрямок текстури вальцювання був перпендикулярним до лінії дії зусилля P_1 під час випробувань. Технологія виготовлення зразків відповідає вимогам [7].

У центрі робочої частини зразка виконували технологічний отвір $\varnothing 2$ mm і наскрізний паз шириною 0,2 mm та довжиною 22 mm, який служить концентратором напружень під час утворення втомної тріщини за циклічного навантаження. Зусилля P_1 і P_2 приклали через спеціальні перехідні пластини завтовшки 12 mm, які кріпляться до зразка болтами М10 через отвори в захватних частинах зразка. На поверхні пластин, які контактують з поверхнею зразка, виконали насічку, яка забезпечує надійне з'єднання і рівномірний розподіл навантаження по перерізу захватних частин зразка.

Навантажували зразок і наводили втомні тріщини абсолютною довжиною 3 mm кожна на універсальній гідравлічній випробувальній машині EUS-40. Тріщини утворювали за асиметрії циклу $R = 0,3$ і частоти навантаження $n = 12$ Hz відповідно до вимог методики [8]. Для двовісного навантаження зразків на машину EUS-40 встановлювали додаткове пристосування [9]. Його конструкція дає можливість випробовувати сталеві зразки товщиною 1...2 mm за відношення зусиль $P_2 / P_1 = \alpha$ в межах $1,5 \geq \alpha \geq -0,5$. Додатні значення жорсткості двовісного навантаження α відповідають силовій схемі “розтяг–розтяг”, а від’ємні – силовій схемі “розтяг–стиск”. За $\alpha < -0,5$ зразок вказаної товщини втрачає стійкість.

Для теоретичного аналізу НДС хрестоподібного зразка створювали повномасштабну тривимірну модель (рис. 2a), яка відтворює форму зразка, а саме: центральний надріз, втомні тріщини (у вигляді математичних розрізів) (рис. 2b) із зонами передруйнування (рис. 2c), захватні частини і перехідні пластини для забезпечення двовісного навантаження зразка розподіленими силами. Для побудови моделі використали паралелепіпедні (20 вузлів), пірамідальні (13 вузлів) та призматичні (15 вузлів) тривимірні елементи. Їх загальна кількість у моделі становила 4152. Під час її побудови елементи згущували в напрямку від захватних частин до центрального надрізу. Окіл вершини тріщини моделювали фрагментом у вигляді циліндра [3], основою якого був полігон з 16-ма вершинами, а віссю – лінія фронту тріщини.

Починаючи від осі в напрямку стінок циліндра, розмір елементів збільшували. По твірній циліндра (по фронту тріщини) створювали 8 шарів елементів, що оптимально за характерного розміру призматичних елементів $a = 20$ μ m.

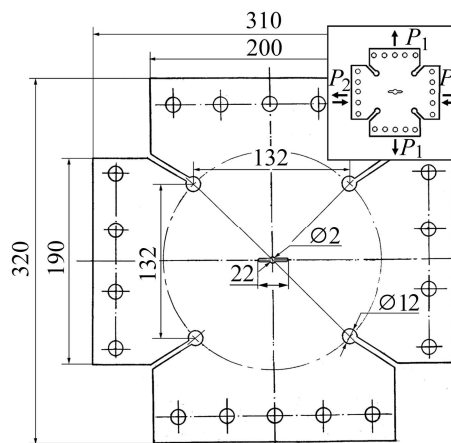


Рис. 1. Схема хрестоподібного зразка.

Fig. 1. Scheme of a cruciform specimen.

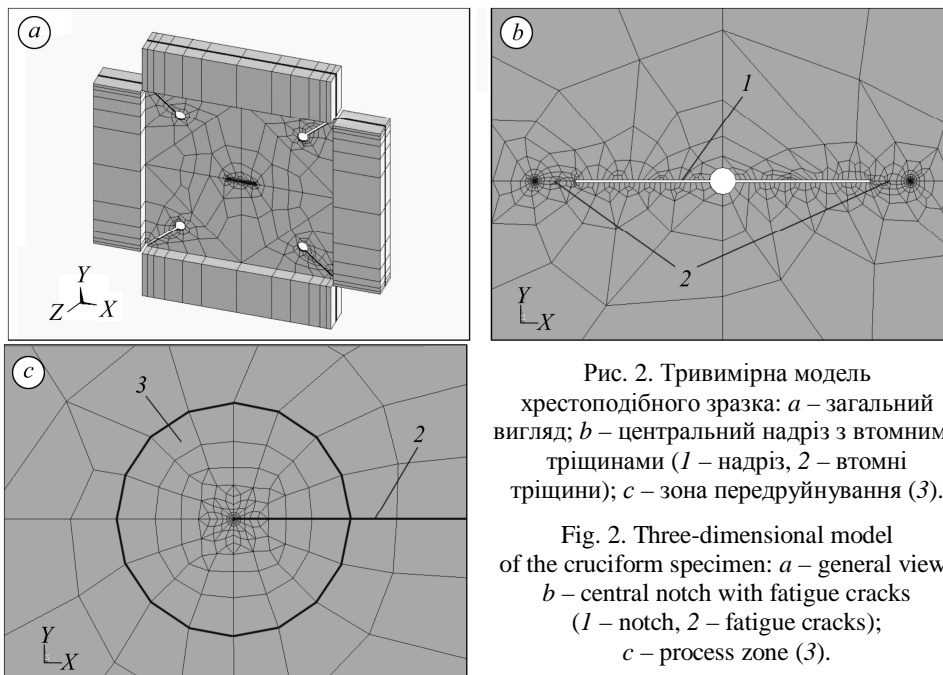


Рис. 2. Тривимірний модель хрестоподібного зразка: *a* – загальний вигляд; *b* – центральний надріз з втомними тріщинами (*1* – надріз, *2* – втомні тріщини); *c* – зона передруйнування (*3*).

Fig. 2. Three-dimensional model of the cruciform specimen: *a* – general view; *b* – central notch with fatigue cracks (*1* – notch, *2* – fatigue cracks); *c* – process zone (*3*).

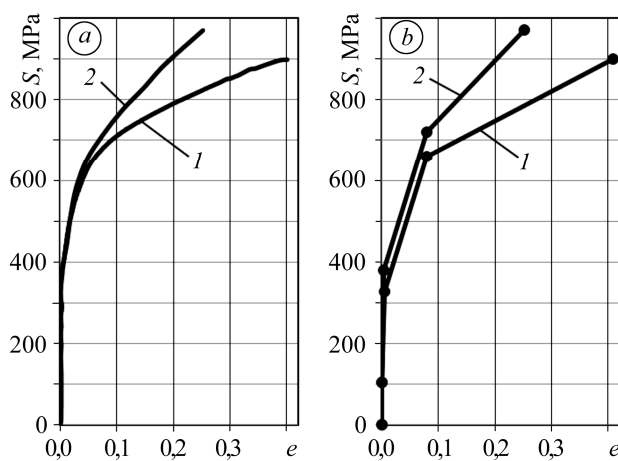


Рис. 3. Експериментальні [11] (*a*) і апроксимовані (*b*) істинні діаграми деформування сталі 65Г: *1* – стан постачання; *2* – після циклічного зміцнення.

Fig. 3. Experimental [11] (*a*) and approximated (*b*) true stress-strain curves of 65Г steel: *1* – as-delivery state; *2* – after strain hardening.

напруженого стану здійснювали рівномірно розподіленим тиском, прикладеним до торців верхньої та бічних перехідних пластин, що еквівалентно експериментально встановленому зусиллю руйнування P_{1c} . При цьому торець нижньої пластини защемлювали. Значення складових деформації e_{xx} , e_{yy} та e_{zz} визначали в зоні передруйнування у характерній точці на продовженні тріщини на відстані 80 μm від її вершини.

Зображення поверхні зразка для розрахунків методом ЦКЗ реєстрували з частотою 0,5 Hz цифровою камерою Olympus E-300 з роздільною здатністю

Для реалізації пружно-пластичного деформування моделі, згідно з теорією Гіла [10], для недеформованого об'єму матеріалу та матеріалу зони передруйнування в околі вершини тріщини (рис. 2*c*) використовували апроксимовані істинні діаграми розтягу сталі 65Г за вихідного та циклічно зміцненого станів (рис. 3*b*). Істинні діаграми деформування будували згідно з методикою [4]. Для пружних ділянок цих діаграм закладали модуль Юнга $E = 210 \text{ GPa}$ і коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$. Статичне двовісне навантаження моделі за умови плоского

$8 \cdot 10^6$ pixels (3264×2448), приєднаною до мікроскопа МБС-10 із штатним джерелом світла. Ця оптична система забезпечує розмір пікселя зображення від 1,2 до 6 μm . Для коректності вимірювань методом ЦКЗ на ділянці поверхні зразка перед вершиною тріщини створювали анізотропний крапковий малюнок еластичною аерозольною фарбою.

Результати досліджень та їх аналіз. Результати експериментальних та теоретичних досліджень НДС хрестоподібного зразка у вигляді ізополів деформацій в умовах одно- та двовісного навантажень наведено на рис. 4.

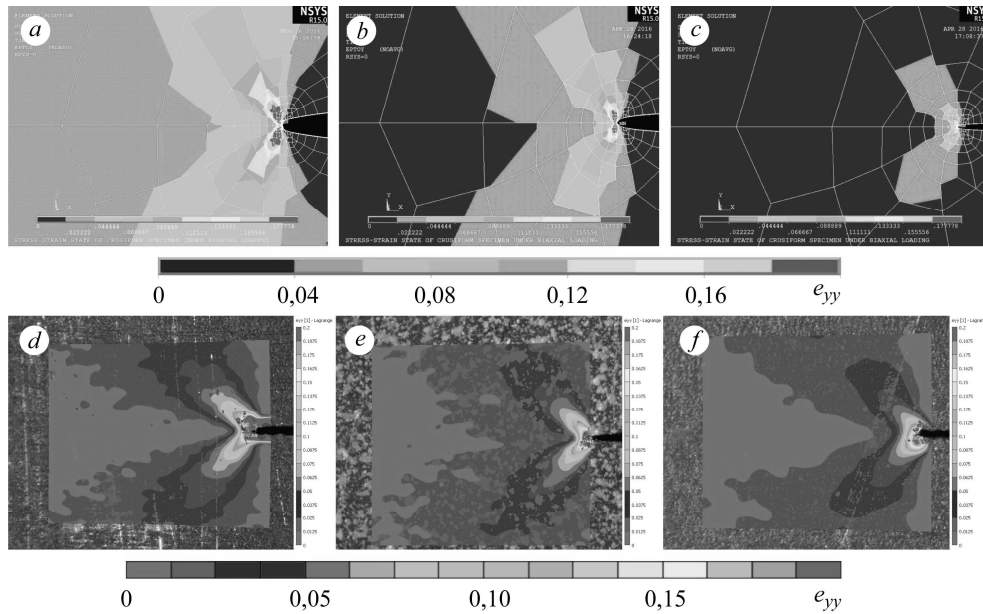


Рис. 4. Поля деформацій e_{yy} , одержані методом МСЕ (a, b, c) та ЦКЗ (d, e, f) за жорсткості навантаження $\alpha = -0,5$ (a, d); $\alpha = 0$ (b, e); $\alpha = 0,7$ (c, f).

Fig. 4. Maps of e_{yy} component of strain, obtained by finite element method (FEM) (a, b, c) and digital image correlation (DIC) (d, e, f) at loading ratio $\alpha = -0.5$ (a, d); $\alpha = 0$ (b, e); $\alpha = 0.7$ (c, f).

Встановлено, що зі зміною жорсткості навантаження від 0,7 до $-0,5$ критичне значення складової деформації e_{xxc} зростає, причому ця деформація завжди від'ємна (стиск), складової e_{yyc} також зростає, а складової e_{zzc} знижується і, як і e_{xxc} , є від'ємним. Оскільки деформацію e_{zz} неможливо визначити методом двовимірної ЦКЗ, то її критичні значення встановлювали за результатами вимірювань зміни товщини зразка в зоні передруйнування тензометричним профілографом [12]. Як видно, залежності складових деформації, одержаних експериментально і за допомогою МСЕ, від жорсткості навантаження якісно подібні. Щодо їх числових значень, то розбіжність для визначальних деформацій e_{yyc} у вищезгаданій характерній точці на продовженні тріщини не перевищує 10% для $\alpha = -0,5$, 18% для $\alpha = 0$ і 22% для $\alpha = 0,7$. Отже, результати аналізу НДС хрестоподібного зразка в умовах одно- та двовісного навантажень засвідчують достовірність досліджень. У таблиці наведено критичні значення складових деформації у характерній точці на продовженні тріщини на базі 16 μm .

Щоб проаналізувати співвідношення критичних значень компонентів деформації, визначених експериментально, до відповідних розрахункових значень, ввели параметр $\beta = e_{ddc}^{(DIC)} / e_{ddc}^{(FEM)}$, де нижній індекс d може набувати значень x , y або z та вказує на напрям вимірювання деформації (див. таблицю). На основі

отриманих результатів побудували гістограму (рис. 5), яка показує залежність параметра β від жорсткості навантаження α . Як бачимо, більшість значень задовольняють умову $\beta < 1$. Це свідчить про те, що розрахунок критичних зовнішніх навантажень елементів металокопункції чи деталей машин методом МСЕ за відомими деформаційними характеристиками матеріалу (локальної критичної деформації e_c або її складових, критичного розкриття тріщини δ_c , питомої енергії пружно-пластичного деформування W_c тощо) дасть значення нижчі за реальні, що, своєю чергою, забезпечить запас міцності копункції.

Критичні значення деформацій біля вершини тріщини за двовісного навантаження

| α | Компоненти деформації | | | Критичні зусилля P_{1c} , kN |
|----------|-----------------------|---------------|-----------------|--------------------------------|
| | e_{xxc} | e_{yyc} | e_{zzc} | |
| 0,7 | -0,025 / -0,028 | 0,140 / 0,179 | -0,190 / -0,120 | 70000 |
| 0 | -0,070 / -0,045 | 0,280 / 0,237 | -0,110 / -0,085 | 77300 |
| -0,5 | -0,072 / -0,051 | 0,310 / 0,282 | -0,050 / -0,050 | 55000 |

Примітка: значення компонентів деформації у чисельнику одержані з використанням МСЕ, а в знаменнику – методом ЦКЗ або тензометричним профілографом.

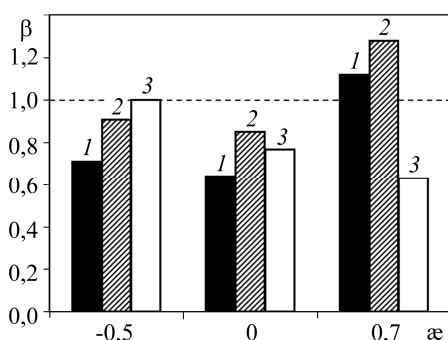


Рис. 5. Залежність параметра β від жорсткості навантаження α :
1 – e_{xxc} ; 2 – e_{yyc} ; 3 – e_{zzc} .

Fig. 5. Dependence of parameter β on loading ratio α :
1 – e_{xxc} ; 2 – e_{yyc} ; 3 – e_{zzc} .

ВИСНОВКИ

Завдяки коректно побудованій моделі, а саме: відтворенню геометрії зразка, врахуванню пластичної зони перед вершиною тріщини і використанню істинної діаграми деформування під час розрахунків вдалося досягнути доброї збіжності експериментальних і розрахункових результатів. Встановлено, що поля деформацій, одержані методами МСЕ та ЦКЗ, якісно подібні, тенденції зміни складових деформації зі зміною жорсткості зовнішнього навантаження ідентичні, а розбіжність між критичними значеннями визначальних складових деформації не перевищує 22% і вказує на запас міцності під час розрахунків.

РЕЗЮМЕ. Проведено сравнение распределений деформации в зоне предразрушения крестообразных образцов при двухосном нагружении, полученных методами цифровой корреляции изображений и конечных элементов. Показано, что использование истинной диаграммы деформирования в алгоритме расчета методом конечных элементов значительно повышает точность моделирования. Установлено влияние двухосного нагружения на распределение деформаций и получена хорошая сходимость экспериментальных и расчетных результатов определения локальных деформаций перед вершиной трещины.

SUMMARY. Comparison of strain maps in the process zone of a cruciform specimen under biaxial loading obtained by digital image correlation technique and finite element analysis is

performed. It is shown that the use of true stress-strain curve in the algorithm of the finite element method significantly improves the accuracy of the simulation. The influence of biaxial loading ratio on local strain distribution is established. Good convergence between experimental and simulation results of local strains determining at the crack tip is obtained.

Робота виконана за підтримки Національного фонду природничих наук Китаю, згідно з проектом № 61170135.

1. *Прогнозування впливу попереднього термомеханічного навантаження на в'язкість руйнування теплостійкої сталі з використанням методу скінченних елементів / П. В. Ясній, Ю. І. Пиндус, В. Б. Гладь, І. Б. Окіпний, І. В. Шульган // Проблеми міцності. – 2011. – 43, № 2. – С. 5–16.*
(*Yasnii P. V., Pyndus Yu. I., Glad'o V. B., Okipnyi I. B., and Shul'gan I. V. FEM prediction of the influence of warm prestressing on fracture toughness of heat-resistant steel // Strength of Materials. – 2011. – 43, № 2. – P. 113–121.*)
2. *Іваницький Я. Л., Гембара О. В., Чепіль О. Я. Оцінювання довговічності елементів енергетичного обладнання з урахуванням впливу експлуатаційного середовища // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – 51, № 1. – С. 93–101.*
(*Ivanyts'kyi Ya. L., Hembara O. V., and Chepil'O. Ya. Determination of the durability of elements of power-generating equipment with regard for the influence of working media // Materials Science. – 2015. – 51, № 1. – P. 104–113.*)
3. *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.*
(*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.*)
4. *Мольков Ю. В. Застосування методу цифрової кореляції зображень до побудови діаграм деформування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – 48, № 6. – С. 121–125.*
(*Mol'kov Yu. V. Application of the method of digital image correlation to the construction of stress-strain diagrams // Materials Science. – 2013. – 48, № 6. – P. 832–837.*)
5. *Chu T., Ranson W., and Sutton M. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics // Experimental Mechanics. – 1985. – 25, № 3. – P. 232–244.*
6. *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.*
7. *ГОСТ 11701-84 / СТ СЭВ 471-77. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. – Введ. 01.01.86.*
8. *ГОСТ 25.506–85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Введ. 01.01.86.*
9. *Опірність руйнуванню сталей за двовісного навантаження у водні / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, Ю. В. Мольков, Л. М. Іваницька // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – 48, № 3. – С. 18–23.*
(*Ivanyts'kyi Ya. L., Shtayura S. T., Mol'kov Yu. V., and Ivanyts'ka L. M. Fracture strength of steels under biaxial loading in hydrogen // Materials Science. – 2012. – 48, № 3. – P. 274–280.*)
10. *Hill R. The Mathematical Theory of Plasticity. – New York: Oxford University Press, 1983. – 356 p.*
11. *Мольков Ю. В. Визначення питомої енергії деформування сталі за циклічного навантаження // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – № 4. – С. 69–75.*
12. *Патент на корисну модель № 75019. Пристрій для профілювання деформованої верхні біля вершини тріщини / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, Ю. В. Мольков, Т. М. Ленковський, Ю. І. Квашневський. – Опубл. 26.11. 2012, Бюл. № 22.*

Одержано 05.08.2016