

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ ЕНЕРГІЇ ДЕФОРМУВАННЯ СТАЛІ 65Г ЗА ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Ю. В. МОЛЬКОВ

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

Розроблено експериментальну методику побудови діаграм циклічного деформування матеріалу перед вершиною втомної тріщини з використанням методу кореляції цифрових зображень та алгоритм обчислення питомої енергії його деформування за циклічного навантаження. Обчислено енергію для трьох значень швидкості поширення втомної тріщини, які відповідають ділянці Періса кінетичної діаграми втомного руйнування. Показано, що сумарні енергетичні затрати на пошкодження матеріалу за циклічного навантаження співмірні з критичним значенням питомої енергії деформування за квазістатичного навантаження.

**Ключові слова:** *циклічне навантаження, питома енергія пружно-пластичного деформування, діаграма циклічного деформування, кореляція цифрових зображень, локальна деформація.*

Здебільшого опірність матеріалу руйнуванню за циклічного навантаження оцінюють за силовим підходом, який ґрунтується на визначенні характеристик циклічної тріщиностійкості на основі побудованих експериментально кінетичних діаграм втомного руйнування. За отриманими характеристиками ранжують матеріали за циклічною тріщиностійкістю і обґрунтовують їх вибір для виробництва елементів конструкцій. Однак оцінити несучу здатність елемента конструкції через коефіцієнт інтенсивності напружень складно, особливо за умов малоциклової втоми. В таких випадках доцільно застосувати енергетичний критерій руйнування, прийнявши за характеристику матеріалу питому енергію деформування [1–4].

Сучасні оптико-цифрові методи, зокрема цифрова кореляція зображень (ЦКЗ) [5–7], дають можливість встановити напружено-деформований стан у об'ємах матеріалу розміром у кілька  $\mu\text{m}^3$ , а отже обчислити питому енергію деформування безпосередньо біля вершини концентратора напружень. Як показано раніше [8], ця енергія не залежить від геометрії твердого деформівного тіла та силової схеми його навантаження.

Розглянемо циклічне навантаження пластини з центральною тріщиною за умов плоского напруженого стану. Нехай маємо деякий елементарний об'єм матеріалу (рис. 1), який з початку навантаження знаходиться на відстані від вершини тріщини, рівній довжині пластичної зони. Поки об'єм знаходиться за межею пластичної зони матеріал у ньому деформується лише пружно. Коли об'єм знаходиться в межах статичної пластичної зони, то матеріал деформується пластично, однак залишкова деформація після кожного циклу навантаження практично відсутня. Коли об'єм матеріалу знаходиться у циклічній пластичній зоні, то його пластичне деформування набуває реверсивного характеру [9] і виникає залишкова деформація після кожного циклу навантаження. Після досягнення внаслідок багаторазового пластичного деформування критичної густини дефектів кристалічної ґратки [10] в елементарному об'ємі матеріал руйнується.

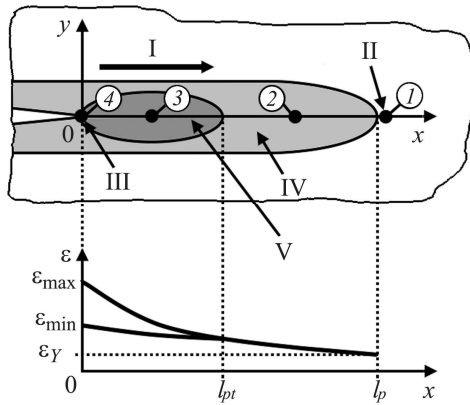


Рис. 1. Зростання розмаху деформації в елементарному об'ємі матеріалу перед вершиною тріщини: 1 – об'єм за межами пластичної зони; 2 – об'єм у межах статичної пластичної зони; 3 – об'єм у межах циклічної пластичної зони; 4 – матеріал зруйновано. I – напрямок росту тріщини; II – елементарний об'єм; III – вершина тріщини; IV – статична пластична зона; V – циклічна пластична зона.

Fig. 1. Increase of strain amplitude in the representative volume of material near the crack tip : 1 – volume is outside the plastic zone; 2 – volume is within static plastic zone; 3 – volume is within cyclic plastic zone; 4 – material is fractured. I – crack growth direction; II – representative volume; III – crack tip; IV – static plastic zone; V – cyclic plastic zone.

вали за асиметрії синусоїдного циклу  $R = 0,3$  і частоти навантаження 12 Hz. Зміну швидкості поширення втомної тріщини досягали збільшенням зовнішнього навантаження за  $R = \text{const}$ . Деформацію в околі вершини втомної тріщини визначали методом ЦКЗ. Зображення реєстрували цифровою камерою TourTech UCMOS 10000KPA з роздільною здатністю  $3600 \times 2800$  pixels, яку кріпили до поверхні зразка за допомогою спеціальної платформи. Масштаб зображень  $3 \mu\text{m}/\text{pixel}$ .

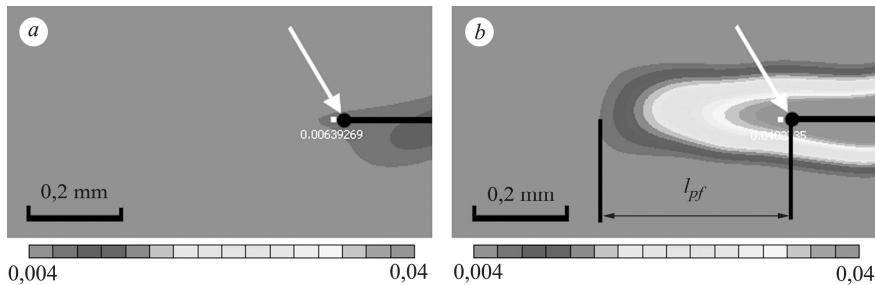


Рис. 2. Розподіл деформації перед вершиною тріщини за мінімального (a) і максимального (b) навантаження циклу. Стрілкою показано вершину тріщини, біла точка – місце відбору даних, яке знаходиться на відстані  $\approx 15 \mu\text{m}$  від вершини тріщини.

Fig. 2. Strain distribution near the crack tip under minimum (a) and maximum (b) load of the cycle. The arrow shows the crack tip, white dot – point of data acquisition, which is located at the distance  $\approx 15 \mu\text{m}$  from the crack tip.

Таким чином, якщо відома амплітуда напружень і деформацій матеріалу за усі цикли навантаження, які відбулись за час проходження елементарним об'ємом відстані від межі циклічної пластичної зони до вершини тріщини, то можна обчислити частину питомої енергії деформування, затрачену на утворення незворотних дефектів структури (пошкоджень), яку надалі називатимемо енергетичними затратами на пошкодження матеріалу.

Мета роботи – розробити методику визначення питомої енергії деформування матеріалу за циклічного навантаження через експериментально визначені локальні напруження і деформації; показати доцільність застосування енергетичного критерію руйнування для оцінювання ресурсу елементів конструкцій за циклічного навантаження.

**Методика експериментальної побудови діаграм циклічного деформування.** Для досліджень використали плоскі зразки з центральною тріщиною довжиною 2 mm і шириною робочої частини 120 mm [11] зі сталі 65Г у стані постачання, яка є циклічно зміцнюваним матеріалом ( $\sigma_B/\sigma_{0,2} > 1,4$ ) [12]. Зразки навантажували за асиметрії синусоїдного циклу  $R = 0,3$  і частоти навантаження 12 Hz. Зміну швидкості поширення втомної тріщини досягали збільшенням зовнішнього навантаження за  $R = \text{const}$ . Деформацію в околі вершини втомної тріщини визначали методом ЦКЗ. Зображення реєстрували цифровою камерою TourTech UCMOS 10000KPA з роздільною здатністю  $3600 \times 2800$  pixels, яку кріпили до поверхні зразка за допомогою спеціальної платформи. Масштаб зображень  $3 \mu\text{m}/\text{pixel}$ .

Оскільки частота реєстрації зображень вказаною камерою становить не більш як 0,5 fps, то на час реєстрації частоту навантаження зразка зменшували до 0,001 Hz. Це давало можливість зареєструвати 16...17 зображень за кожен цикл навантаження. Розмір кроку (бази) вимірювання переміщень для сталі 65Г обрали рівним 15  $\mu\text{m}$  за критеріями праці [8]. Розмір кроку відповідає розміру елементарного об'єму матеріалу, для якого визначали питому енергію деформування.

Зображення обробляли за алгоритмом методу ЦКЗ і одержували відповідні поля деформації за різних рівнів навантаження (рис. 2). На основі цих результатів будували графіки залежності деформації від часу в кількох точках на лінії продовження тріщини для трьох послідовних циклів навантаження (рис. 3). Одержані графіки використовували для побудови діаграм циклічного деформування в координатах "істинні напруження  $S$ –істинна деформація  $e$ ". Чутливість вимірювальної системи становила 0,03  $\mu\text{m}$  за переміщеннями і 0,0001 за деформаціями, що давало можливість фіксувати залишкову деформацію після кожного циклу навантаження. Як видно з рис. 3 деформація за максимального і мінімального навантаження зростає для кожного наступного циклу.

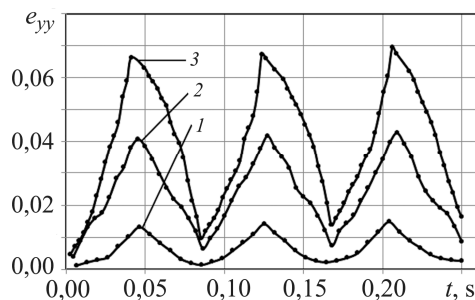


Рис. 3. Експериментально одержані графіки зміни деформації в часі на відстані 15  $\mu\text{m}$  від вершини тріщини для трьох циклів навантаження за таких швидкостей поширення тріщини (m/cycle): 1 –  $7,5 \cdot 10^{-9}$ ; 2 –  $8,5 \cdot 10^{-8}$ ; 3 –  $3,05 \cdot 10^{-6}$ .

Fig. 3. Experimentally obtained graphs of strain vs. time at the distance 15  $\mu\text{m}$  from the crack tip under three loading cycles for crack growth rates: 1 –  $7.5 \cdot 10^{-9}$ ; 2 –  $8.5 \cdot 10^{-8}$ ; 3 –  $3.05 \cdot 10^{-6}$ .

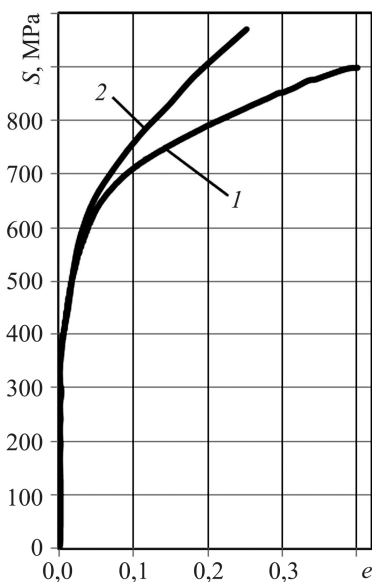
Рис. 4. Істинні діаграми деформування вихідної (1) і деформаційно зміцненої (2) сталі 65Г.

Fig. 4. True stress-strain curves of as delivered (1) and strain hardened (2) 65G steel.

За довжину циклічної пластичної зони  $l_{pf}$  приймали відрізок на продовженні тріщини, де відношення деформації за максимального навантаження циклу до деформації за мінімального навантаження  $>1$  (див. рис. 1).

Для врахування впливу деформаційного зміцнення будували істинні діаграми деформування вихідної і зміцненої сталі 65Г (рис. 4), згідно з методикою [13].

Для деформаційного зміцнення навантажували гладкий циліндричний зразок циклічним згином за частоти 2 Hz. Деформація в робочій частині зразка становила  $\pm 3\%$ , а кількість циклів навантаження визначали з умови  $N \leq N^*$ , де  $N^*$  – кількість циклів до зародження тріщини. Такий режим обрали для забезпечення максимального зміцнення матеріалу.



Для обчислення напружень, які відповідають визначеній деформації, використовували апроксимаційні функції криволінійних ділянок істинних діаграм деформування, які для сталі 65Г у вихідному і зміцненому стані мають вигляд:

$$S_1(e) = 1087,15e^{0,244} \quad (1)$$

$$S_2(e) = 1266,00e^{0,218} \quad (2)$$

Діаграми циклічного деформування елементарного об'єму у статичній пластичній зоні будували, використовуючи апроксимаційну функцію (1), у циклічній пластичній зоні – функцію (2). В результаті одержали діаграми циклічного деформування матеріалу біля вершини тріщини (рис. 5).

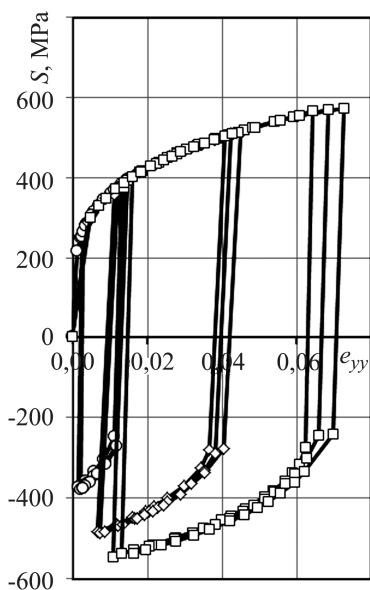


Рис. 5. Діаграми циклічного деформування за різних швидкостей ( $V$ ) поширення тріщини (m/cycle):  
 $\circ$  –  $7,5 \cdot 10^{-9}$ ;  $\diamond$  –  $8,5 \cdot 10^{-8}$ ;  $\square$  –  $3,05 \cdot 10^{-6}$ .

Fig. 5. Cyclic stress-strain curves for different crack growth rates ( $V$ ) (m/cycle):  
 $\circ$  –  $7.5 \cdot 10^{-9}$ ;  $\diamond$  –  $8.5 \cdot 10^{-8}$ ;  $\square$  –  $3.05 \cdot 10^{-6}$ .

**Обчислення енергетичних затрат на пошкодження матеріалу за циклічного навантаження.** Обчислимо енергетичні затрати  $U$  на пошкодження матеріалу у циклічній пластичній зоні за один цикл навантаження. Для цього розглянемо діаграми циклічного деформування за два послідовні цикли навантаження (рис. 6). Площа, яка обмежена петлею діаграми відповідає енергії пружно-пластичного деформування матеріалу елементарного об'єму. Для кожного наступного циклу навантаження за умов

малоциклової втоми [14] ця енергія завжди більша від енергії попереднього циклу. Різниця енергій двох послідовних циклів відповідає енергетичним затратам на пошкодження матеріалу (утворення незворотних дефектів структури), інша частина відповідає енергії реверсивної пружно-пластичної деформації [15].

Як бачимо (рис. 6), крива попереднього циклу описує меншу площу, ніж крива наступного. Різниця цих площ рівна  $U$ . Отже, наближено питомі енергетичні затрати на пошкодження матеріалу за один цикл навантаження можна обчислити як різницю площ паралелограма DCH1 і паралелограмів ABGF і EFKJ.

Для цього необхідно знати різниці деформацій  $n$ -го і  $n+1$ -го циклів на ділянках діаграми, які відповідають зростанню і зниженню зовнішнього навантаження, відповідно  $\Delta e_{\max}$  і  $\Delta e_{\min}$  на рис. 6, а також границі текучості  $S_y^t$ ,  $S_y^c$  і максимальні напруження циклу за розтягу і стиску  $S_{\max}^t$ ,  $S_{\max}^c$ . Тоді  $U$  для деякої відстані елементарного об'єму від вершини тріщини за один цикл навантаження дорівнюватиме:

$$U = \Delta e_{\max} (|S_{\max}^t| + |S_y^c|) - \Delta e_{\min} (|S_y^t| + |S_{\max}^c|) \quad (3)$$

З віддаленням від вершини тріщини величина  $U$  зменшується і на межі циклічної пластичної зони  $l_{pf}$  дорівнює нулю.

Оскільки величина  $U$  пропорційна деформації, то залежність  $U$  від відстані  $x$  до вершини тріщини подібна за формою до кривої розподілу деформації на продовженні тріщини за максимального навантаження циклу, і її можна з достатньою точністю описати поліномом 4-го степеня:

$$U(x) = a_1 x^4 + a_2 x^3 + a_3 x^2 + a_4 x + a_5. \quad (4)$$

Припустимо, що на відрізку рівному довжині пластичної зони  $l_p$  тріщина поширюється зі сталою швидкістю, тобто

$$V = \text{const} \rightarrow x = N \cdot V.$$

Рис. 6. Визначення енергетичних затрат на пошкодження матеріалу з діаграми циклічного деформування.

Fig. 6. Determination of damage energy from the cyclic stress-strain curve.

Тоді залежність  $U$  від кількості циклів до руйнування елементарного об'єму матиме вигляд

$$U(N) = a_1(N \cdot V)^4 + a_2(N \cdot V)^3 + a_3(N \cdot V)^2 + a_4(N \cdot V) + a_5. \quad (5)$$

Сумарні енергетичні затрати  $U_\Sigma$  за кількість циклів навантаження  $N_{pf}$  від моменту входження елементарного об'єму в циклічну пластичну зону до руйнування матеріалу у ньому можна обчислити так:

$$U_\Sigma = \int_0^{N_{pf}} U(N) dN. \quad (6)$$

За умову руйнування матеріалу приймемо рівність

$$U_\Sigma = W_c, \quad (7)$$

де  $W_c$  – питома енергія руйнування матеріалу за квазістатичного навантаження, визначена за методикою [8].

**Результати та їх аналіз.** За одержаною формулою і експериментальними результатами обчислено  $U_\Sigma$  для трьох значень швидкості поширення втомної тріщини. Обрані швидкості відповідають початку, середині і закінченню ділянки Періса кінетичної діаграми втомного руйнування.

Рис. 7. Залежність енергетичних затрат на пошкодження матеріалу  $U$  від кількості циклів навантаження  $N$  до руйнування матеріалу елементарного об'єму (точки – експеримент, лінії – апроксимація поліномом (4)).  $N_{pf}$  – кількість циклів навантаження, за яку тріщина підростає на довжину  $l_{pf}$ . Криві 1–3 відповідають швидкостям поширення тріщини  $V = 7,5 \cdot 10^{-9}$  m/cycle;

$V = 8,5 \cdot 10^{-8}$  m/cycle;

$V = 3,05 \cdot 10^{-6}$  m/cycle відповідно.

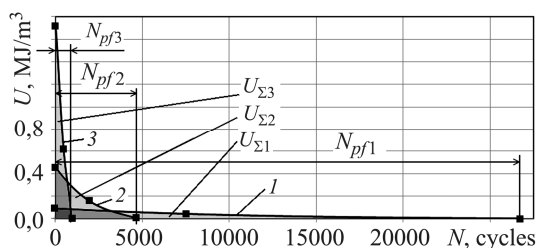


Fig. 7. Dependence of damage energy  $U$  of one cycle on the number of loading cycles  $N$  until fracture of the representative volume of material (points – experiment data, lines – polynomial approximation (4)).  $N_{pf}$  – number of loading cycles at which the crack grows to a length  $l_{pf}$ .

Curves 1–3 correspond to crack growth rates  $V = 7.5 \cdot 10^{-9}$  m/cycle;

$V = 8.5 \cdot 10^{-8}$  m/cycle;  $V = 3.05 \cdot 10^{-6}$  m/cycle.

Для встановлення залежності енергетичних затрат від відстані до вершини тріщини обчислювали величину  $U$  за формулою (3) для кількох значень відстані  $x$  аж до межі циклічної пластичної зони  $l_{pf}$ . За межею  $l_{pf}$  різниці деформацій  $\Delta e_{\min}$  і  $\Delta e_{\max}$  наявними технічними засобами не виявили, тому вважали, що там  $U = 0$ . Одержані експериментальні залежності апроксимували поліномами вигляду (4). Після перетворення, згідно з формулою (5), одержали залежності  $U$  від кількості циклів до руйнування елементарного об'єму  $N$  (рис. 7) і обчислювали сумарні енергетичні затрати  $U_{\Sigma}$  за формулою (6).

Вихідні дані для розрахунку наведено в таблиці. Для спрощення розрахунків границі текучості сталі 65Г за розтягу і стиску приймали рівними, так само як і максимальні напруження циклу за розтягу і стиску, тобто ефектом Баушінгера нехтували. Максимальні напруження циклу  $S_{\max}^t$ ,  $S_{\max}^c$  обчислювали, підставляючи максимальні деформації циклу за розтягу і стиску  $e_{\max}^t$ ,  $e_{\max}^c$ , які встановлювали з графіка зміни деформацій в часі (див. рис. 3), у формулу (1).

**Дані для розрахунку енергетичних затрат на пошкодження матеріалу**

$V$ , m/cycle	$e_{\max}^t/e_{\max}^c$	$\Delta e^t/\Delta e^c$	$S_m$	$S_{\max}^t/S_{\max}^c$	$l_{pf}$ , mm	$N_{pf}$ , cycles	$U_{\Sigma}$	$W_c$
			МПа				MJ/m <sup>3</sup>	
$7,5 \cdot 10^{-9}$	0,01476/0,00136	0,00016/0,00029	300	369/369	0,2	26660	752	500
$8,5 \cdot 10^{-8}$	0,0409/0,0074	0,00089/0,0014		496/496	0,4	4706	745	
$3,05 \cdot 10^{-6}$	0,0695/0,0138	0,0021/0,0041		571/571	2,8	918	703	

Одержані значення сумарних енергетичних затрат  $U_{\Sigma}$  є вищими в середньому на 30%, ніж критична питома енергія деформування  $W_c$ , що є очікуваним, оскільки коректну величину  $W_c$  можна одержати лише з повних істинних діаграм деформування матеріалу [16], експериментальна побудова яких досить складна.

Однак, очевидно, що навіть за наближеного розрахунку величина  $U_{\Sigma}$ , обчислена згідно зі запропонованим підходом, є співмірною з критичною питомою енергією деформування сталі 65Г, визначеною за статичного навантаження. Це свідчить про загальну коректність запропонованої експериментальної методики і алгоритму розрахунку та перспективу застосування енергетичного критерію руйнування для визначення ресурсу елементів конструкцій.

### ВИСНОВКИ

Встановлено, що сумарні енергетичні затрати на пошкодження матеріалу за циклічного навантаження практично не залежать від швидкості поширення втомної тріщини, що свідчить про інваріантність цієї характеристики. Встановлено, що величина  $U_{\Sigma}$  співмірна з критичною питомою енергією деформування сталі 65Г, визначеною за статичного навантаження.

**РЕЗЮМЕ.** Разработаны экспериментальная методика построения диаграмм циклического деформирования материала перед вершиной усталостной трещины с использованием метода корреляции цифровых изображений и алгоритм вычисления удельной энергии его деформирования при циклической нагрузке. Вычислена энергия для трех значений скорости распространения усталостной трещины, которые соответствуют участку Пэриса кинетической диаграммы усталостного разрушения. Показано, что суммарная энергия повреждения при циклической нагрузке сопоставима с критическим значением удельной энергии деформирования при квазистатической нагрузке.

**SUMMARY.** An experimental technique for construction of the cyclic stress-strain curves of representative volume of material ahead of the fatigue crack tip using digital image correlation method is developed. An algorithm for specific strain energy calculation under cyclic

loading is developed. The energy for three values of fatigue crack growth rate that correspond to the Paris region of fatigue crack growth rate curve, is calculated. It is shown that the total energy spent for material damage under cyclic loading is close to the critical value of specific strain energy under quasi-static loading.

1. *Gillemot L. F.* Criterion of crack initiation and spreading // *Eng. Fract. Mech.* – 1976. – **8**. – P. 239–253.
2. *Sih G. C.* A Special Theory of Crack Propagation, Methods of Analysis and Solution to Crack Problems. – Wolters-Noordhoff: Springer Netherlands, 1973. – 518 p.
3. *Shindler H. J.* Strain energy density as the link between global and local approach to fracture // *Proc. 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Fract.* – USA: Honolulu, 2001. – CD-ROM.
4. *Kujawski D.* Fatigue failure criterion based on strain energy density // *Mechanika teoretyczna i stosowana.* – 1989. – **1**, № 27. – P. 15–22.
5. *Chu T., Ranson W., and Sutton M.* Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics // *Exper. Mech.* – 1985. – **25**, № 3. – P. 232–244.
6. *Панасюк В. В., Іваницький Я. Л., Максименко О. П.* Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони передруйнування // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2004. – **40**, № 5. – С. 67–72.  
(*Panasyuk V. V., Ivanyts'kyi Ya. L., and Maksymenko O. P.* Analysis of the elastoplastic deformation of the material in the process zone // *Materials Science.* – 2004. – **40**, № 5. – P. 648–655.)
7. *Визначення локальної деформації біля концентраторів напружень методом цифрової кореляції зображень / Я. Л. Іваницький, Ю. В. Мольков, П. С. Кунь, Т. М. Ленковський, М. Войтович // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2014. – **50**, № 4. – С. 8–24.  
(*Ivanyts'kyi Ya. L., Mol'kov Yu. V., Kun P. S., Lenkovs'kyi T. M., Wójtowicz M.* Determination of the local strains near stress concentrators by the digital image correlation technique // *Materials Science.* – 2015. – **50**, № 4. – P. 488–495.)
8. *Мольков Ю. В.* Оцінювання опірності руйнуванню ємностей під тиском із використанням енергетичного підходу: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. – Львів, 2014. – 20 с.
9. *Rice J. R.* Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue // *Fatig. crack propagation, ASTM STP 415, Am. Soc. Testing Mats.* – 1967. – P. 247–311.
10. *Пластическая деформация металлов [Електронний ресурс].* – Режим доступу до ресурсу: <https://www.youtube.com/watch?v=IBZwnqJ1F44>.
11. *Опірність руйнуванню сталей за двовісного навантаження у водні / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штайора, 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., Ivanyts'ka L. M.* Fracture strength of steels under biaxial loading in hydrogen // *Materials Science.* – 2012. – **48**, № 3. – P. 274–280.)
12. *Терентьев В. Ф.* Усталость металлических материалов. – М.: Наука, 2003. – 254 с.
13. *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.)
14. *Серенсен С. В.* Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению: уч. пос. для вузов. – М.: Атомиздат, 1975. – 192 с.
15. *Троценко В. Т.* Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – К.: Наук. думка, 1981. – 344 с.
16. *Чаусов Н. Г., Лебедев А. А.* Особенности разрушения пластичных листовых материалов // *Проблемы прочности.* – 2003. – **35**, № 4. – С. 5–13.  
(*Chausov N. G., Lebedev A. A.* Fracture mechanism in plastic sheet materials // *Strength of Materials.* – 2003. – **35**, № 4. – P. 327–333.)

Одержано 30.05.2016