

УДК:539:3 621:3

ОПІРНІСТЬ РУЙНУВАННЮ СТАЛЕЙ ЗА ДВОВІСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ У ВОДНІ

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

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

Досліджено напружено-деформований стан у зоні передруйнування в околі вершини тріщини у хрестоподібних зразках із сталі 09Г2С за непропорційного двовісного навантаження. Отримано розподіл деформацій у цій зоні на ділянці розміром 6×4,5 mm методом цифрової кореляції спекл-зображень. Порівняно поля розподілу деформацій та критичні параметри, отримані на повітрі і у водні. Встановлено, що за двовісного навантаження критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_C , критичне розкриття тріщини δ_C і критична деформація ε_C біля її вершини змінюються в межах 15; 47 і 40%, відповідно, залежно від параметра жорсткості навантаження α . У водні виявлено зсув максимуму залежності P_C від параметра α в бік додатних його значень. Максимальний вплив водню на δ_C і ε_C спостерігають за одновісного розтягу ($\alpha = 0$).

Ключові слова: *пропорційне двовісне навантаження, водень, пружно-пластичні деформації, критичне розкриття тріщини, зона передруйнування, цифрова кореляція спекл-зображень, жорсткість напруженого стану.*

Елементи конструкцій енергетичного обладнання знаходяться під дією складного навантаження та водневомісного середовища. Зокрема, трубопроводи газотранспортної системи, посудини під тиском та ін. працюють в умовах двовісного навантаження, яке може бути як статичним, так і циклічним. Біля концентраторів напружень, що є в цих елементах, за складного навантаження відбувається перерозподіл напружень, змінюється характер течіння матеріалу в околі концентратора (тріщини), а отже, важливо встановити гранично рівноважний стан тіла у таких випадках [1–3]. Тому, під час розроблення методів оцінювання залишкового ресурсу роботи елементів конструкцій з використанням методів механіки руйнування, що працюють за складного навантаження, необхідно використовувати опірність руйнуванню матеріалів, яка враховувала б умови їх силового навантаження та вплив середовища, зокрема характеристики тріщиноустійкості конструкційних матеріалів. Такі характеристики, отримані за одновісного розтягу зразків, недостатні для оцінювання роботоздатності конструкцій, які працюють за умов складного напружено-деформованого стану.

Мета роботи – дослідити вплив двовісного навантаження на опірність матеріалу руйнуванню та зміну розподілу пружно-пластичних деформацій в зоні передруйнування біля вершини тріщини.

Зразки, обладнання та методика досліджень. В основу досліджень покладено силову схему навантаження хрестоподібного зразка розтягувальним зусиллям P_1 , що діє перпендикулярно до лінії поширення тріщини, та зусиллям P_2 , що діє вздовж лінії поширення тріщини і може бути стискальним або розтягальним (рис. 1).

Хрестоподібні зразки з розмірами робочої частини 120×120 mm виготовляли із холоднокатаної листової сталі 09Г2С товщиною $t = 1,5$ mm так, щоб волокна прокатування були перпендикулярні до напрямку дії розтягальних зусиль P_1 під час випробувань.

Контактна особа: С. Т. ШТАЮРА, e-mail: dep-12@ipm.lviv.ua

У центрі робочої частини зразка свердлили отвір діаметром 2 mm, від якого в обидві сторони робили надріз товщиною 0,2 mm та загальною довжиною $2l = 22$ mm. Зразки з такими надрізами циклічно навантажували зусиллями P_1 і виводили втомні тріщини за стандартною методикою [4] за асиметричного циклу з коефіцієнтом асиметрії $R = 0,3$.

Для навантаження хрестоподібного зразка стискальним або розтягальним зусиллям P_2 , що діє вздовж лінії поширення тріщини, розроблено пристрій (рис. 2), який монтується на машині EUS-40. Він складається з силової рами 1, закріпленої до верхньої нерухокої поперечини машини регульованими тягами 9. До рами через шарніри закріплено гідроциліндри 2, штоки яких шарнірно з'єднані із захоплювачами 3, у яких закріплено хвостові частини хрестоподібного зразка 4. Захоплювачі 3 прямолінійно переміщуються у направляючих 5, закріплених жорстко до рами 1. До гідроциліндрів від насосної установки УНГР-2000 подається олива, тиск якої контролюється манометром 6 та давачем тиску 7, сигнал від якого через аналого-цифровий перетворювач подається у комп'ютер. Під час розвантаження зразка оливу зливають через кран 8. Таким чином, створюючи тиск у гідроциліндрах, навантажують зразок силою P_2 . Змінюючи співвідношення зусилля P_2 до зусилля P_1 ($\alpha = P_2 / P_1$), можна змінювати напружено-деформований стан в матеріалі біля вершини тріщини.

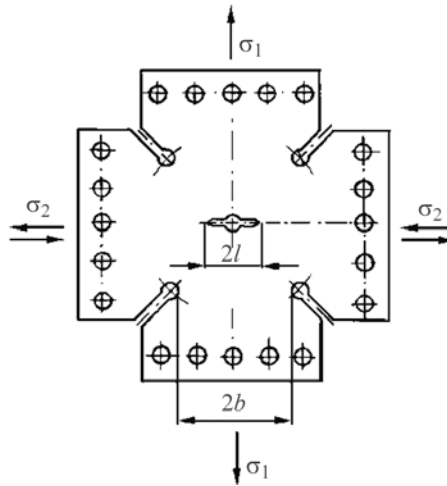


Рис. 1. Ескіз хрестоподібного зразка для двовісного навантаження.

Fig. 1. Chart of a cruciform specimen for biaxial loading.

Рис. 2. Схема пристрою для двовісного навантаження хрестоподібного зразка:

- 1 – силова рама; 2 – гідроциліндри;
- 3 – захоплювачі;
- 4 – хрестоподібний зразок;
- 5 – направляючі; 6 – манометр;
- 7 – давач тиску оливи; 8 – кран;
- 9 – регульовані тяги.

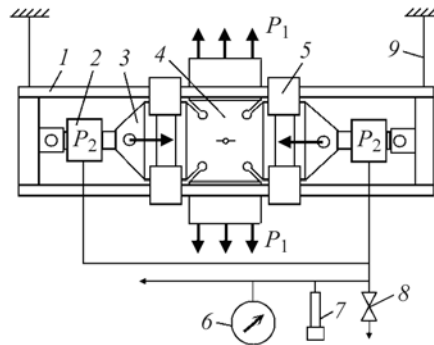


Fig. 2. Device for biaxial loading of a cruciform specimen: 1 – power frame; 2 – hydraulic cylinders; 3 – grippers; 4 – cruciform specimen; 5 – gripper rails; 6 – manometer; 7 – oil pressure gauge; 8 – tap; 9 – adjustable rods (schematically).

Конструкція пристрою дає змогу випробовувати зразки завтовшки 1...2 mm за співвідношення зусилля P_2 до P_1 (жорсткості двовісного навантаження $\alpha = P_2/P_1$) в межах від 0,5 (розтяг + стиск) до 1,2 (розтяг + розтяг). Навантажували зразок синхронно зусиллями P_2 і P_1 за постійної жорсткості навантаження α .

Досліджували наводнені зразки у камері [5], яка складається з двох частин і монтується безпосередньо на зразку, закріпленому у захоплювачах випробувальної машини, що значно спрощує її конструкцію та дає можливість уникнути проміжних ланок, через які навантажують зразок. За такої конструкції камери можна

використовувати метод цифрової кореляції спекл-зображень (ЦКСЗ) для вимірювання деформацій у зоні передруйнування. Зразки наводнювали у камері впродовж 3 h за температури 200°C і тиску газоподібного водню 0,3 МПа. Безпосередньо після наводнення зразки випробовували без розгерметизації камери і реєстрували: зусилля P_1 і P_2 , розкриття у центрі надрізу за допомогою давача переміщень двоконсольного типу, деформації на відстані 2,5 mm перед вершиною тріщини у двох взаємоперпендикулярних напрямках наклеєними тензорезисторами з базою вимірювання 5 mm. Записували відеоролик деформування ділянки поверхні зразка розміром 6×4,5 mm перед вершиною тріщини з частотою 2 кадри за секунду камерою з роздільною здатністю 640×480 пікселів, встановленою на спеціальній платформі і закріпленій до зразка на продовженні лінії поширення тріщини, для визначення розподілу деформацій методом ЦКСЗ. Зі зворотного боку здійснювали відеозапис деформування поверхні зразка для моніторингу кінетики пластичної зони за допомогою мікроскопа МБС-10 з вмонтованою відеокамерою.

За результатами статичних випробувань сталі 09Г2С за двовісного навантаження визначали силову характеристику тріщиностійкості досліджуваного матеріалу – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) K_C за формулою [6]

$$K_C = F_{yI}(\Theta) \cdot \sigma_{y*} \cdot \sqrt{\pi l} + F_{xI}(\Theta) \cdot \sigma_x \cdot \sqrt{\pi l}, \text{ коли } \Theta = 0, F_{xI} = F_{yI}(\pi/2).$$

$$\sigma_{y*} = P_C / S; \quad \sigma_x = P_2 / S.$$

Тут F_{yI} , F_{xI} – безрозмірні функції, які враховують двовісність навантаження; σ_{y*} , σ_x – напруження від дії зусиль P_1 і P_2 ; $\Theta = 0$ – кут нахилу тріщини; σ_{y*} – критичне напруження, що відповідає критичному зусиллю P_C ; S – площа поперечного перерізу зразка.

На основі праці [6] встановлено, що для двовісного навантаження зразка з центральною тріщиною ($\Theta = 0$) $F_{yI}(0) = 1,2$, а $F_{xI}(\pi/2) = -0,25$.

За фотографіями ділянки перед вершиною тріщини визначали її критичне розкриття δ_C на момент старту, а за переміщеннями ліній розмітки на поверхні перед тріщиною розраховували критичне значення деформації ε_C на базі 2 mm. Після обробки фотографій методом ЦКСЗ отримали поля деформацій, за якими оцінювали форму і розміри зони максимальних деформацій перед вершиною тріщини [7].

Результати та їх обговорення. Досліджували зразки зусиллями P_1 і P_2 за статичного синхронного навантаження до моменту старту тріщини під час жорсткого навантаження за таких значень α : -0,5; -0,2; 0; 0,6; 1,0; 1,2; 1,5 на повітрі та 0; 0,9; 1,2; 1,5 у водні.

Отримані критичні значення параметрів K_C , δ_C та ε_C для синхронного двовісного навантаження хрестоподібного зразка за різних значень жорсткості навантаження α наведено в таблиці та на рис. 3. Звідси (рис. 3a) видно, що стискальні чи розтягальні зусилля P_2 значно змінюють критичну силу P_C , за якої відбувається старт тріщини, а її величина набуває максимуму за значень $\alpha = 0,6$ та 1,2 на повітрі і у водні, відповідно. За іншої жорсткості навантаження α критичне зусилля P_C зменшується. Очевидно, що поперечна стискальна сила значно полегшує старт тріщини.

За двовісного навантаження ($\alpha > 0,8$) тріщиностійкість K_C у водні і на повітрі значно знижується, а вплив водню нівелюється (рис. 3b). Деформаційні характеристики тріщиностійкості δ_C і ε_C (рис. 3c, d) мають дещо іншу залежність від жорсткості навантаження і середовища. Тут максимум спостерігають за нульового значення α , тобто за умов одновісного розтягу. Зміна жорсткості навантаження (як за розтягу, так і за стиску) викликає його зменшення, яке є інтенсивнішим за зміни α у бік стиску ($\alpha < 0$). Вплив водню на ці характеристики проявляється у значному їх зниженні за нульової жорсткості навантаження під час одновісного розтягу, а з її збільшенням цей вплив зменшується (див. таблицю, рис. 4).

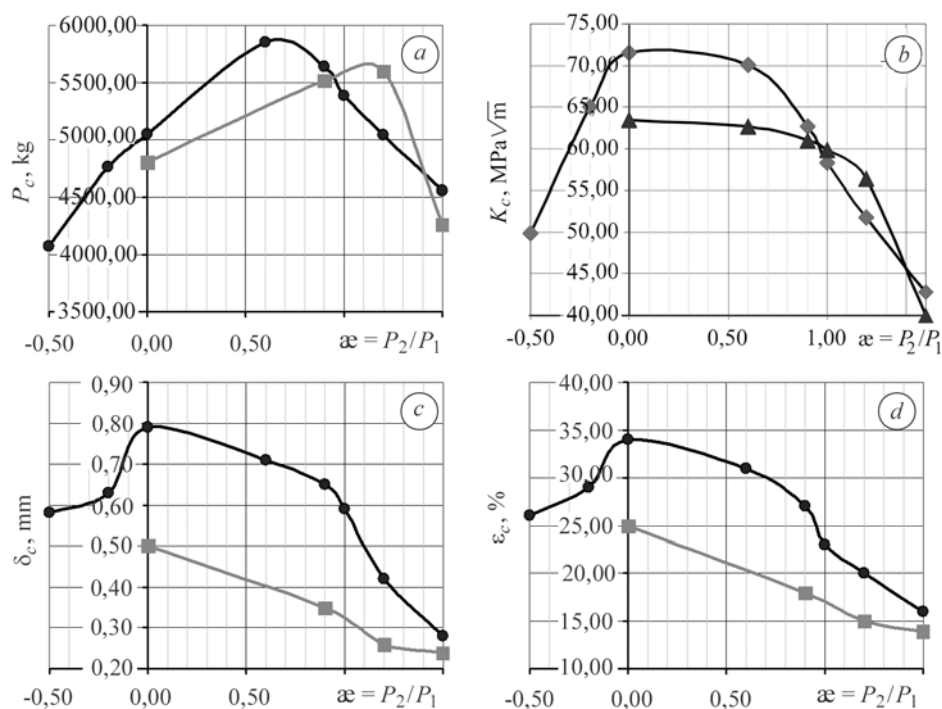


Рис. 3. Залежності критичних параметрів P_C (a); K_C (b); ϵ_C (c) і δ_C (d) від жорсткості двовісного навантаження α : ● – повітря; ■ – водень.

Fig. 3. Dependences of critical parameters P_C (a); K_C (b); ϵ_C (c) and δ_C (d) on the biaxial loading rigidity, α : ● – air; ■ – hydrogen.

Критичні значення експериментальних параметрів у повітрі/водні

Жорсткість навантаження, α	Зусилля старту тріщини P_{1C} , kg	Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_C , $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	Критичне розкриття вершини тріщини δ_C , mm	Критична деформація у вершині тріщини на базі 2 mm ϵ_C , %
1,5	4560 / 4260	42,8 / 40,0	0,28 / 0,24	16 / 14
1,2	5040 / 5600	51,8 / 57,8	0,42 / 0,26	20 / 15
1	5383 / 5700	58,3 / 60,9	0,59 / 0,33	23 / 17
0,9	5640 / 5520	62,6 / 61,0	0,65 / 0,35	27 / 18
0,6	5855 / 5300	70,1 / 63,6	0,71 / 0,4	31 / 21
0	5050 / 4800	71,2 / 65,7	0,79 / 0,50	34 / 25
-0,2	4760 / -	63,7 / -	0,63 / -	29 / -
-0,5	4070 / -	49,9 / -	0,58 / -	26 / -

На рис. 4 подано ізолінії еквівалентних деформацій за критичного навантаження, отримані методом ЦКСЗ на ділянці поверхні розміром $6 \times 4,5$ mm перед вершиною тріщини. Для розподілів деформацій за від'ємних значень α характерним є увігнутість ізоліній в напрямку до вершини тріщини, що свідчить про значні деформації ϵ_x на продовженні тріщини в напрямку перпендикулярному до дії основного розтягального зусилля P_1 . Це підтверджується графіками розподілів деформацій на лінії продовження тріщини (рис. 4). За нульової жорсткості ($\alpha = 0$) деформації ϵ_x і ϵ_y максимальні. За розтягальних ($\alpha = 1$) чи стискальних ($\alpha = -0,5$) поперечних сил деформації ϵ_x значно зменшуються.

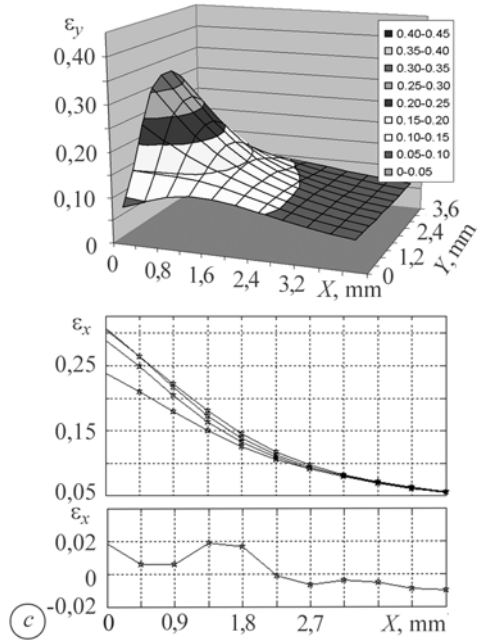
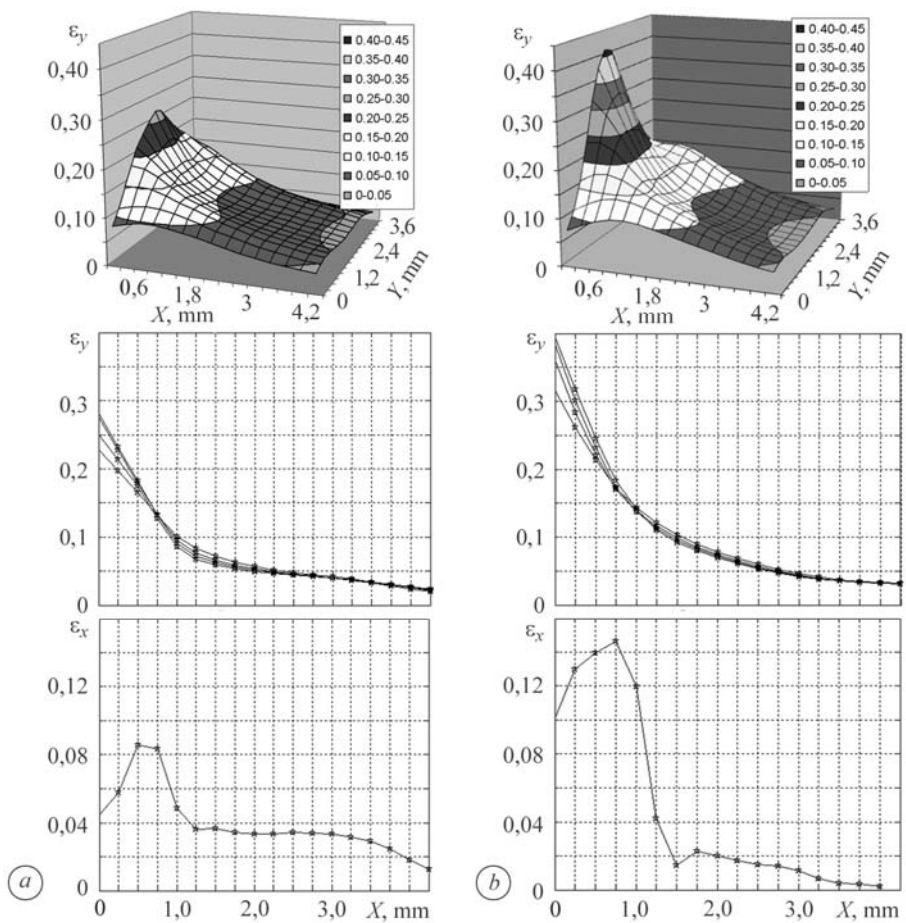


Рис. 4. Графіки розподілу деформацій ϵ_y , ϵ_x та їх ізолінії біля вершини тріщини для гранично-рівноважного стану за різної жорсткості двовісного навантаження сталі 09Г2С: $a - \alpha = -0,5$; $b - 0$; $c - 1$. Бази деформування 1; 2; 3 і 4 mm.

Fig. 4. Graphs of deformation ϵ_y , ϵ_x distribution and contour map of deformation near the crack tip at the moment of crack start for different values of parameter α for 09Г2С steel: $a - \alpha = -0.5$; $b - 0$; $c - 1$. Bases of deformation measuring 1; 2; 3 and 4 mm.

Розподіл деформацій ϵ_y на лінії продовження тріщини (рис. 4) для від'ємних значень α характеризується різким спадом з віддаленням від вершини тріщини, тоді як для додатних значень цей спад плавний.

ВИСНОВКИ

В умовах двовісного навантаження за стискальної або розтягальної поперечної сили P_2 , що діє паралельно до лінії тріщини, змінюються як силові, так і деформаційні характеристики опірності руйнуванню матеріалу. За зміни жорсткості навантаження α від $-0,5$ до $1,0$ зусилля старту тріщини P_{1C} змінюються в межах 30%, критичне розкриття δ_C у вершині тріщини – 47%, критична деформація ε_C біля вершини тріщини – 40%, тріщиностійкість K_C – 15%. У водні виявлено зсув максимуму зусилля старту тріщини в бік додатних значень жорсткості навантаження α . За двовісного навантаження ($\alpha > 0,8$) тріщиностійкість K_C у водні і на повітрі значно знижується, а вплив водню нівелюється. Вплив водню на характеристики δ_C і ε_C є максимальний за одновісного розтягу ($\alpha = 0$).

Двовісне навантаження змінює співвідношення компонентів тензора деформацій ε_x і ε_y , зокрема за високих додатних значень α складова деформації ε_x значно зменшується, що свідчить про зміну границі течіння матеріалу за складного напружено-деформованого стану.

РЕЗЮМЕ. Исследовали напряженно-деформированное состояние в зоне предразрушения на крестообразных образцах из стали 09Г2С при непропорциональной двухосной нагрузке. Получено распределение деформаций на участке размером $6 \times 4,5$ mm методом цифровой корреляции спекл-изображений. Проведено сравнение полей распределения деформаций и критических параметров, полученных на воздухе и в водороде. Установлено, что при двухосном нагружении критический коэффициент интенсивности напряжений K_C , критическое раскрытие вершины трещины δ_C и критическая деформация ε_C изменяются в пределах 15, 47 и 40%, соответственно, в зависимости от параметра жесткости нагрузки α . В водороде обнаружен сдвиг максимума зависимости P_C от параметра α в сторону положительных значений. Максимальное влияние водорода на δ_C и ε_C наблюдается при одноосном растяжении ($\alpha = 0$).

SUMMARY. The stress-strain state of material in the process zone on a cruciform specimen made of 09Г2С sheet steel under non-proportional biaxial loading is investigated. The distribution of deformations in the region 6×4.5 mm is obtained by digital correlation method. The comparison of deformation distribution fields and critical parameters obtained under uniaxial loading in air and in hydrogen is done. It is established that under biaxial loading the critical SIF K_C , crack opening displacement δ_C and critical deformation ε_C changes within the limits of 15%; 47 and 40% accordingly, depending on parameter α . The shift of the maximums of dependences P_C from parameter α in the direction of higher positive values in hydrogen is obtained. The maximal hydrogen influence on δ_C and ε_C in the case of uniaxial loading ($\alpha = 0$) is observed.

1. *Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии* / А. А. Лебедев, Б. И. Ковальчук, Ф. Ф. Гигиняк, В. П. Ламашевский. – К.: Наук. думка, 2003. – 540 с.
2. *Писаренко Г. С., Лебедев А. А.* Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – К.: Наук. думка, 1976. – 376 с.
3. *Визначення характеристик тріщиностійкості матеріалів під двовісним навантаженням* / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, Р. Б. Костів та ін. // *Машинознавство*. – 2004. – № 7. – С. 31–34.
4. *Методы механических испытаний металлов, определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении* // *Методические указания*. – М.: Международный ЦНТИ, 1993. – 53 с.
5. *Патент на винахід № 9053.* Камера для випробування плоских зразків за одно- та двовісного навантаження у середовищі водню / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, Ю. В. Мольков, Т. М. Ленковський. – Опубл. 11.05.2010 р., Бюл. № 9.
6. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2 т.* / Ю. Ито, Ю. Мураками, Н. Хасебэ, С. Аони. – М.: Мир, 1990. – 478 с.
7. *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 // *Soviet Materials Science*. – 2004. – **40**, № 5. – P. 648–655).

Одержано 01.03.2012