

УДК 539:431,434:669.788

## ВПЛИВ ВОДНЮ НА ЗАРОДЖЕННЯ ПОВЗУЧО-ВТОМНИХ ТРІЩИН У ПЛАСТИНАХ БІЛЯ КОНЦЕНТРАТОРІВ НАПРУЖЕНЬ

О. Є. АНДРЕЙКІВ<sup>1</sup>, І. Я. ДОЛІНСЬКА<sup>2</sup>, Л. Н. ДОБРОВОЛЬСЬКА<sup>3</sup>,  
Н. В. ЯВОРСЬКА<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Львівський національний університет імені Івана Франка;

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>3</sup> Луцький національний технічний університет

Сформульовано математичну модель для визначення впливу водню на період зародження повзучо-втомної макротріщини в пластині біля концентратора напружень. На основі цієї моделі розраховано період зародження макротріщини для смуги з двома боковими вирізами за циклічних навантажень, високих температур і водневовмісного середовища. Показано, що водень пришвидшує зародження тріщин у сталевій пластині.

**Ключові слова:** водневовмісне середовище, період зародження повзучо-втомної макротріщини, концентратор напружень, коефіцієнт інтенсивності напружень.

В експериментальних та теоретичних дослідженнях [1–4] повзучо-втомного руйнування матеріалів та елементів конструкцій основну увагу приділяють докритичному росту повзучо-втомних тріщин. Однак для бездефектних матеріалів значну частину довговічності елементів конструкцій займає період зародження тріщин. Більше того, бувають випадки, коли за високих навантажень ресурс елемента складається лише з періоду зародження повзучо-втомних тріщин.

На сьогодні уже відома низка математичних моделей, методів та критерій оцінки визначення періоду зародження тріщин в елементах конструкцій за втоми і сумісної дії втоми з повзучістю [1, 5]. Проте багато таких елементів працюють під впливом водню, який полегшує зародження та поширення втомних тріщин і цим зменшує їх довговічність. Тому актуальною проблемою сьогодення є вивчення впливу водню на зародження дефектів (тріщин) у металевих матеріалах та елементах конструкцій. На сьогодні в літературі таких досліджень недостатньо. Тому тут запропонували розрахункову модель, яка описує зародження повзучо-втомних тріщин у пластинах з концентраторами напружень за дії водневовмісного середовища.

**Формулювання математичної моделі.** Розглянемо елемент конструкції (пластину), який послаблений вирізом з радіусом заокруглення у вершині  $r$  (рис. 1), за циклічного навантаження з витримками  $t_*$  під дією високотемпературного поля  $T$  (температура елемента конструкції є вища половини температури плавлення його матеріалу  $T > 0,5T_{mp}$ ), що створює в зоні передруйнування високотемпературну повзучість. Разом з тим пластина знаходиться в умовах дії водневовмісного середовища, що спричиняє біля вершини вирізу концентрацію водню  $C_0$ . Задача полягає у визначенні кількості циклів навантаження  $N = N_i$ , після яких у вершині концентратора (вирізу) утвориться повзучо-втомна макротріщина за дії водневовмісного середовища.

Контактна особа: О. Є. АНДРЕЙКІВ, e-mail: andreykiv@ipm.lviv.ua

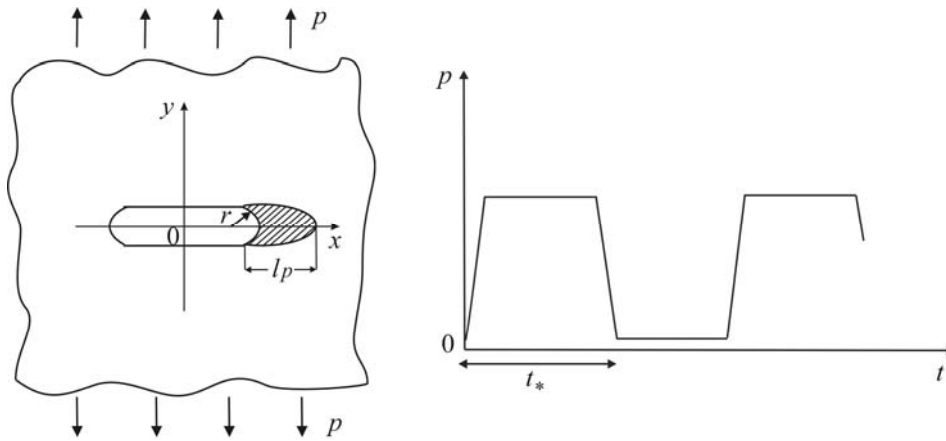


Рис. 1. Схема навантаження пластини з вирізом.

Fig. 1. Loading scheme of a plate with a hole.

Розв'яжемо задачу на основі раніше запропонованої розрахункової моделі [1] визначення періоду зародження втомних тріщин за високих температур. Припускаємо, що місцем зародження повзучо-втомної макротріщини буде пластична зона (зона передруйнування), яка виникає біля вершини концентратора за дії на нього прикладених навантажень  $p$  (рис. 1). Вважаємо, що основним чинником зародження макротріщини є втома з повзучістю, а водень тільки посилює або послаблює цей процес. Далі припускаємо, як і за кімнатних температур [5], що інтенсивність проходження в області передруйнування процесів накопичення і зародження втомних пошкоджень повністю контролюється максимальною амплітудою деформації розтягу  $\varepsilon_{\max}$  у цій області. Відомо [5], що для макротріщини деформація  $\varepsilon_{\max}$  у зоні передруйнування біля вершини пропорційна її розкриттю  $\delta_{\max}$ , тобто

$$\varepsilon_{\max} / \varepsilon_{fC} = \delta_{\max} / \delta_{fC} . \quad (1)$$

Тут  $\varepsilon_{fC}$ ,  $\delta_{fC}$  – критичні значення деформації та розкриття відповідно, за яких матеріал руйнується.

Разом з тим, спираючись на результати праць [1, 5], вважаємо, що зародження повзучо-втомної тріщини відбувається неперервно з нульової довжини і характеризується змінною швидкістю  $V$ , яка є функцією максимальної деформації розтягу  $\varepsilon_{\max}$  за цикл у зоні передруйнування, тобто

$$V = dl/dN = \Phi^{-1}(\lambda, C_H) , \quad (2)$$

де  $\Phi(\lambda, C_H)$  – характеристична функція втомного руйнування [1, 2];  $\lambda = \sqrt{\varepsilon_{\max} / \varepsilon_{fC}}$ .

Аналогічно [1, 5] приймаємо, що швидкість зародження тріщини довжиною  $l$  буде така ж, як і для її поширення за тієї ж максимальної амплітуди деформації  $\varepsilon_{\max}$  у зоні передруйнування. Враховуючи це і результати праці [1], для визначення швидкості  $V$  зародження макротріщини запишемо рівняння

$$V = dl/dN = 0,25\alpha_0\sigma_t(1-R)^4 \left\{ \left[ \delta_{t\max} + \dot{\delta}_{Ht\max}(x, C_H) \ln((t_0 + t_*)/t_1) \right]^2 - \left[ \delta_{th} + \dot{\delta}_{Hth\max}(x, C_H) \ln((t_0 + t_*)/t_1) \right]^2 \right\} \cdot \left[ \sigma_t \delta_{fC} - \sigma_t \delta_{t\max} \right]^{-1} . \quad (3)$$

Тут  $\alpha_0$  – константа, яку визначають із експерименту [1];  $R$  – коефіцієнт асиметрії циклу;  $\delta_{t \max}$  – максимальне за цикл розкриття  $\delta_t$  тріщини в її вершині за усередненого напруження  $\sigma_t$  у зоні передруйнування;  $\delta_{th}$  – нижнє порогове значення розкриття  $\delta_t$  вершини тріщини, нижче якого нема повзучо-втомного руйнування;  $\delta_{fC}$  – критичне значення розкриття  $\delta_t$ ;  $t_1$  – константа високотемпературної повзучості, яку визначають із експерименту;  $t_*$  – період витримки в циклі;  $t_0 = 1$  h;  $\dot{\delta}_{Ht \max}(0, C_H)$  – швидкість розкриття у вершині зароджуваної тріщини за високотемпературної повзучості і водневовмісного середовища в зоні передруйнування.

Невідому величину  $\dot{\delta}_{Ht \max}(0, C_H)$ , яка входить в рівняння (3) визначасмо так. Для першої і другої ділянки діаграми повзучості відомі [3] співвідношення для визначення деформації

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + v_1 t + v_2 \ln \frac{t_0 + t}{t_1}; \quad \dot{\varepsilon}(t) = v_1 + v_2 \frac{1}{t_0 + t}, \quad (4)$$

де  $v_1$  – швидкість усталеної повзучості;  $v_2$  – початкова швидкість повзучості. Із результатів [3] відомо, що між  $v_1$  і  $v_2$  існує залежність

$$v_2 \approx \alpha v_1, \quad (5)$$

тобто на основі (4) і (5) можна записати

$$\dot{\varepsilon}(0) = \alpha_1 v_1, \quad \alpha_1 = (1 + \alpha). \quad (6)$$

Разом з тим, як показують результати експериментальних досліджень [6, 7], для малих і середніх концентрацій водню  $C_H(t)$  величину  $v_1(C_H)$  можна подати залежністю

$$v_1(C_H) = v_1(0)(1 + \beta_1 C_H), \quad (7)$$

де  $C_H$  – концентрація водню в точці зони передруйнування, в якій починається руйнування. Згідно з результатами [8], для малих і середніх концентрацій водню зміну  $C_H$  з часом  $t$  в місці максимальної деформації зони передруйнування можна подати лінійною залежністю

$$C_H = \beta_2 C_0 t, \quad (8)$$

де  $\beta_1, \beta_2$  – константи, які визначають із експерименту. На основі залежностей (7) і (8) для довільного  $t$  і за дії водню рівняння (6) можна записати так:

$$\dot{\varepsilon}_H(C_H) = \dot{\varepsilon}(0)(1 + \beta_1 \beta_2 C_0 t). \quad (9)$$

Враховуючи, що між деформацією в зоні передруйнування  $\varepsilon(t)$  і розкриттям у вершині тріщини  $\delta_t(t)$  існує прямолінійна залежність [9], тобто  $\varepsilon(t) \sim \delta_t(t)$ , швидкість розкриття  $\dot{\delta}_{Ht \max}(x, C_H)$  у вершині тріщини запишемо так:

$$\dot{\delta}_{Ht \max}(0, C_H) = \dot{\delta}_{t \max}(0, 0) \cdot (1 + \beta_1 \beta_2 C_0 t), \quad (10)$$

де  $\dot{\delta}_{t \max}(0, 0)$  – швидкість розкриття тріщини за усталеної повзучості.

На основі результатів [10] цю швидкість подамо залежністю

$$\dot{\delta}_{t \max} = A_1 \left[ \delta_{t \max} \delta_{fC}^{-1} \right]^m, \quad (11)$$

де  $A_1, m$  – константи високотемпературної повзучості, які знаходимо із експерименту [10].

З використанням (10), (11) і (1), а також формули  $\delta_{fC} = K_{fC}^2 E^{-1} \sigma_t^{-1}$ , рівняння (3) набуде вигляду

$$V = dl/dN = 0,25\alpha_0 \cdot (1-R)^4 \times \\ \times \left\{ \left[ \varepsilon_{\max} \varepsilon_{fC}^{-1} K_{fC}^2 + A_2 \cdot \left[ \varepsilon_{\max} / \varepsilon_{fC} \right]^m (1 + \beta_1 \beta_2 C_0 t_*) \ln((t_0 + t_*) / t_1) \right]^2 - \right. \\ \left. - \left[ \varepsilon_{th} \varepsilon_{fC}^{-1} K_{fC}^2 + A_2 \cdot \left[ \varepsilon_{th} / \varepsilon_{fC} \right]^m (1 + \beta_1 \beta_2 C_0 t_*) \ln((t_0 + t_*) / t_1) \right]^2 \right\} \times \\ \times \sigma_t^{-1} E^{-1} \cdot K_{fC}^{-2} (1 - \varepsilon_{\max} \varepsilon_{fC}^{-1})^{-1}, \quad (12)$$

де  $A_2 = A_1 t_0 E \sigma_t$ ;  $E$  – модуль пружності;  $K_{fC}$  – критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН);  $\varepsilon_{th}$  – нижнє порогове значення деформації розтягу  $\varepsilon$ .

З огляду на вищевказане припущення співвідношення (1), (2) описують і зародження тріщини, якщо тільки під параметром  $l$  розуміти її довжину, а під  $\varepsilon_{\max}$  – деформацію в її вершині з урахуванням концентратора. Тоді початкова умова для рівняння (12) матиме вигляд  $l = 0$  при  $N = 0$ , тобто у вихідному стані пластини тріщина відсутня. Кінцева умова зародження макротріщини зумовлена тим, що при  $N = N_i$  вона досягає довжини  $l = l_p$ , коли виконуються умови автомодельності, тобто тріщину вважають макроскопічною [2]. Як сказано раніше [5], довжина тріщини зародження рівна довжині вихідної пластичної зони  $l_p$  біля вершин концентратора напружень.

Деформацію  $\varepsilon_{\max}$  у вершині тріщини, яка входить у рівняння (12), визначаємо так [5]:

$$\varepsilon_{\max} = (\varepsilon_{fC} K_{\max}^2 l + \varepsilon_0 K_{fC}^2 (l_p - l)) / K_{fC}^2 l_p, \quad (13)$$

де  $K_{\max}$  – максимальне значення КІН для тріщини довжини  $l = l_p$  [2];  $\varepsilon_0$  – максимальна деформація біля концентратора у вихідному стані за відсутності тріщини [9]

$$\varepsilon_0 = \{1 + (r/r_0)^2\}^{-1/2} (K_{\max} / K_{fC})^2 \varepsilon_{fC}, \quad r_0 = 4K_{fC}^2 / \pi E \sigma_0 \varepsilon_{fC}, \quad (14)$$

де  $r$  – радіус кривизни концентратора;  $K_{\max}$  – максимальне значення КІН за цикл.

Порівнюючи вирази (12) і (2), функцію  $\Phi(\lambda, C_H)$  запишемо у вигляді

$$\Phi(\lambda, C_H) = 4\alpha_0^{-1} \cdot (1-R)^{-4} \times \\ \times \left\{ \left[ \varepsilon_{\max} \varepsilon_{fC}^{-1} K_{fC}^2 + A_2 \cdot \left[ \varepsilon_{\max} / \varepsilon_{fC} \right]^m (1 + \beta_1 \beta_2 C_0 t_*) \ln((t_0 + t_*) / t_1) \right]^2 - \right. \\ \left. - \left[ \varepsilon_{th} \varepsilon_{fC}^{-1} K_{fC}^2 + A_2 \cdot \left[ \varepsilon_{th} / \varepsilon_{fC} \right]^m (1 + \beta_1 \beta_2 C_0 t_*) \ln((t_0 + t_*) / t_1) \right]^2 \right\}^{-1} \times \\ \times \sigma_t E K_{fC}^2 (1 - \varepsilon_{\max} \varepsilon_{fC}^{-1}). \quad (15)$$

Інтегруючи рівняння (2) з урахуванням (15) і результатів [1, 5], отримаємо вираз для визначення періоду  $N_i$  зародження повзучо-втомної макротріщини у водневовмісному середовищі.

$$N_i = \frac{4\sigma_t E}{\alpha_0 (1-R)^4} \int_0^{l_p} \{ [\varepsilon_{\max} \varepsilon_{fC}^{-1} K_{fC}^2 + A_2 \cdot [\varepsilon_{\max} / \varepsilon_{fC}]^m (1 + \beta_1 \beta_2 C_0 t_*) \times$$

$$\begin{aligned} & \times \ln((t_0 + t_*)/t_1)^2 - [\varepsilon_{th} \varepsilon_{fC}^{-1} K_{fC}^2 + A_2 \cdot [\varepsilon_{th} / \varepsilon_{fC}]^m (1 + \beta_1 \beta_2 C_0 t_*) \times \\ & \times \ln((t_0 + t_*)/t_1)^2]^{-1} \cdot K_{fC}^2 (1 - \varepsilon_{\max} \varepsilon_{fC}^{-1}) dl. \end{aligned} \quad (16)$$

У формулі (16) розмір пластичної зони  $l_p$  визначимо на основі результатів [1] так:

$$l_p = \frac{1}{8} \left( \frac{4K_{\max}^2}{\pi \sigma_t^2} - r \right). \quad (17)$$

**Вплив водню на період зародження макротріщини у смугі з двома боковими вирізами.** Розглянемо смугу зі сталі 321 [4] з двома боковими вирізами за втоми, високої температури і водневовмісного середовища (рис. 2). Задача полягає у визначенні кількості циклів навантаження  $N = N_i$ , за досягнення яких розглянутий елемент зруйнується. Задачу розв'яжемо, використовуючи співвідношення (16), (17). Величину  $K_{I\max}$ , що входить у формули (16), (13) і (14), запишемо з результатів [1] у вигляді

$$K_{I\max} = \frac{2,243 \alpha_2 p \sqrt{\pi b}}{\sqrt{(1-\eta)(4 + \eta(1,25\pi^2 \alpha_2^2 - 4))}}, \quad \eta = b/L, \quad (18)$$

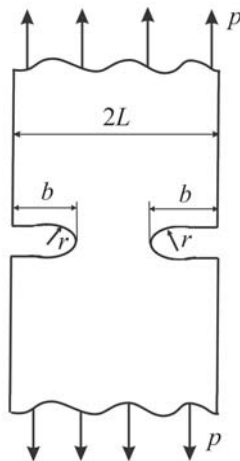


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Схема навантаження смуги з двома боковими вирізами.

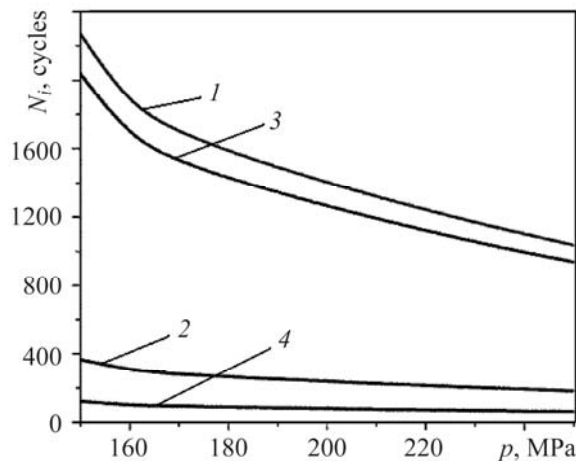


Рис. 3. Fig. 3.

Fig. 2. Loading scheme of a strip with two side notches.

Рис. 3. Залежність  $N_i \sim p$  для смуги з двома боковими вирізами з врахуванням дії водню (2, 4) та без (1, 3): 1, 2 -  $t_* = 6$  h; 3, 4 -  $t_* = 12$  h.

Fig. 3. Dependence  $N_i \sim p$  for a strip with two side notches taking into account the action of hydrogen (2, 4) and without it (1, 3): 1, 2 -  $t_* = 6$  h; 3, 4 -  $t_* = 12$  h.

де  $b$  – глибина вирізів;  $L$  – півширина пластини;  $\alpha_2$  – коефіцієнт концентрації напружень у вершині вирізу ( $\alpha_2 = 2p^{-1}(\pi r)^{-1/2} K_{\max}$  [1]). Тут характеристики високотемпературної повзучості знаходимо на основі праці [4]:  $K_{fC} = 100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ,  $K_{th} = 7,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ,  $\sigma_t = 450 \text{ MPa}$ ,  $E = 1,9 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ ,  $A_1 = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ m/h}$ ,

$m = 0,85$ ,  $t_* = 12$  h,  $t_1 = 0,0128$  h,  $\alpha_0 = 1,24$ ,  $R = 0$ , а геометричні параметри вибираємо такі:  $b = 4$  mm,  $L = 20$  mm,  $r = 1,3$  mm. Вважаючи, що характеристики наводнювання сталей 321 і 15X2МФА відрізняються несуттєво, шукані величини для сталі 321 вибираємо на основі результатів праці [6]:  $\beta_1 = 2,22$  (ppm)<sup>-1</sup>,  $\beta_2 = 0,22$  h<sup>-1</sup>,  $C_0 = 0,9$  ppm. У результаті цього на рис. 3 за співвідношенням (12) побудовані графічні залежності періоду зародження макротріщини від навантаження смуги за різних витримок з врахуванням (криві 2, 4) і без врахування (криві 1, 3) дії на смугу водневовмісного середовища. Із наведених залежностей бачимо, що водень пришвидшує зародження повзучо-втомної макротріщини. Поряд з цим показано, що зменшення періоду витримки збільшує період зародження тріщини.

Якщо виключити високу температуру, витримку в циклі і дію водню, то рівняння (16) набуде вигляду

$$N_i = \frac{4E\sigma_t}{\alpha_0(1-R)^4} \int_0^{l_p} \frac{K_{fC}^2(1-\varepsilon_{\max}\varepsilon_{fC}^{-1})}{\varepsilon_{fC}^{-2}K_{fC}^4(\varepsilon_{\max}^2 - \varepsilon_{th}^2)} dl. \quad (19)$$

На рис. 4 на основі (19) побудована графічна залежність періоду  $N_i$  зародження тріщини біля вершини концентратора (див. рис. 2) від навантаження  $p$  для пластини, виготовленої зі сталі 65Г [12] з такими механічними характеристиками:  $K_{th} = 8,5$  МПа $\sqrt{m}$ ;  $K_{fC} = 110$  МПа $\sqrt{m}$ ;  $\sigma_t = 560$  МПа;  $\alpha_0 = 0,055$ ;  $E = 1,9 \cdot 10^5$  МПа;  $R = 0,05$  і навантаженої циклічним розтягом. Тут також наведені експериментальні результати [11] для цієї силової схеми і навантаження. Порівняння експериментальних і аналітичних залежностей свідчить на користь останньої і разом з тим підтверджує коректність співвідношення (16).

## ВИСНОВКИ

За деформаційним підходом побудовано кінетичне рівняння для визначення періоду зародження повзучо-втомної тріщини в тонкостінних елементах конструкцій з концентраторами напружень в умовах дії циклічного навантаження, високої температури і водневовмісного середовища. Застосування рівняння продемонстровано на прикладі задачі про циклічний розтяг смуги з двома боковими вирізами за умов високотемпературної повзучості та дії водню. Встановлено, що водень зменшує період зародження тріщини.

**РЕЗЮМЕ.** Сформулировано математическую модель для определения влияния водорода на период зарождения ползуче-усталостной макротрещины в пластине возле концентратора напряжений. На основе этой модели рассчитан период зарождения макротрещины для полосы с двумя боковыми вырезами при циклических нагрузках, высоких температурах и водородсодержащей среде. Показано, что водород повышает скорость зарождения трещин.

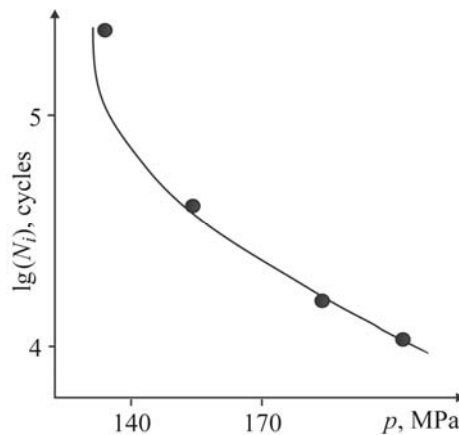


Рис. 4. Порівняння розрахункових залежностей  $N_i \sim p$  (лінія) з експериментальними (●) для сталі 65Г.

Fig. 4. Comparison of the calculated dependences  $N_i \sim p$  (line) and experimental data (●) for 65Г stainless steel.

*SUMMARY.* The mathematical model for determination of the influence of hydrogen on creep-fatigue crack initiation period in plates with stress concentrators was formulated. Based on this model the crack initiation period for a strip with two side notches under cyclic loads, high temperatures and in hydrogen-containing environment were calculated. It is shown that hydrogen increases the rate of initiation cracks.

1. *Андрейків О. Є., Долінська І. Я., Яворська Н. В.* Оцінка періодів зародження і поширення повзучо-втомних тріщин у тонкостінних елементах конструкцій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 3. – С. 7–15.  
(*Andreikiv O. Ye., Dolindka I. Ya, and Yavorska N. V.* Estimation of the periods of initiation and propagation of creep-fatigue cracks in thin-walled structural elements // *Materials Science.* – 2011. – **47**, № 3. – P. 273–283.)
2. *Андрейкив А. Е.* Пространственные задачи теории трещин. – К.: Наук. думка, 1982. – 246 с.
3. *Garofalo F.* Fundamentals of creep and creep-rupture in metals. – New-York; London: Mac Millan Company, 1970. – 344 p.
4. *Creep, fatigue and creep-fatigue crack growth rates in parent and simulated HAZ type 321 stainless steel / D. N. Gladwin, D. A. Miller, G. J. Neate, and R. H. Priest // Fatigue and Fract. Eng. Mater. and Struct.* – 1988. – **11**, № 5. – P. 35.
5. *Андрейкив А. Е., Дарчук А. И.* Усталостное разрушение и долговечность конструкций. – К.: Наук. думка, 1992. – 134 с.
6. *Бабій Л., Студент О., Загорський А.* Властивості корпусної сталі 15Х2МФА за умов повзучості у газоподібному водні // Фіз. хім. механіка матеріалів. – 2008. – Т. 1, Спец-вип. № 7. – С. 100–105.
7. *Анализ ползучести и длительной прочности титанового сплава ВТ6 с предварительно внедренным водородом / А. М. Локощенко, А. А. Ильин, А. М. Мамонов, В. В. Назаров // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2008. – **44**, № 5. – С. 98–104.  
(*Analysis of the creep and long-term strength of VT6 titanium alloy with preliminarily injected hydrogen / A. M. Lokoshchenko, A. A. P'in, A. M. Mamonov, V. V. Nazarov // Materials Science.* – 2008. – **44**, № 5. – P. 700–707.)
8. *Андрейків О. Є., Гембара О. В.* Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2007. – 346 с.
9. *Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Партон В. З.* Основы механики разрушения. – К.: Наук. думка, 1988. – **1**. – 488 с.
10. *Андрейків О. Є., Сас Н. Б.* Докритичний ріст плоскої тріщини в тривимірному тілі за високотемпературної повзучості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – **44**, № 2. – С. 19–26.  
(*Andreikiv O. Ye. and Sas N. B.* Subcritical growth of a plane crack in a three-dimensional body under the conditions of high-temperature creep // *Materials Science.* – 2008. – **44**. – № 2. – P. 163–174.)
11. *Ярема С. Я., Попович В. В.* Влияния структуры и концентрации напряжений на период зарождения усталостной трещины в стали 65Г // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1973. – № 6. – С. 66–72.

Одержано 12.09.2013