

УДК 539.3

Г.О. АНИЩЕНКО

РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ФРОНТУ РУЙНУВАННЯ ПРИ ПОВЗУЧОСТІ В ПЛАСТИНАХ З НАДРІЗАМИ

Надані результати аналізу накопичення пошкоджень внаслідок повзучості та визначення часу розповсюдження фронту руйнування в пластині, які послаблені гострими та круговими симетричними надрізами. Встановлено, що тривалість повного руйнування пластин в умовах неоднорідного напруженого стану внаслідок концентрації напружень біля надрізів може бути досить значною.

Ключові слова: надрізи, концентрація напружень, пошкоджуваність, повзучість, руйнування.

Вступ. Наукові дослідження щодо аналізу накопичення пошкоджуваності й розповсюдження тріщин внаслідок повзучості є особливо актуальними для елементів машинобудівних конструкцій, які послаблені різноманітними надрізами та працюють в складних температурних і силових умовах.

В даній роботі на основі запропонованого методу чисельного аналізу розповсюдження фронту руйнування на прикладі пластин з надрізами надані результати аналізу накопичення пошкоджень внаслідок повзучості та визначення часу розповсюдження фронту руйнування.

Концентратори типу гострих або кругових надрізів доволі часто зустрічаються в деталях машин та мають конструктивне або технологічне значення. Довговічність багатьох деталей машин (пластин, стрижнів, оболонок, дисків) залежить від процесів деформування в послаблених концентраторах ділянках. Наприклад, в дисках компресорів й турбін авіадвигунів досить часто є отвори для проходження повітря, стягуючих болтів, та в цих зонах на практиці спостерігають руйнування.

На базі теоретичних підходів та чисельних методів розрахунку на повзучість й довготривалу міцність статично та циклічно навантажених елементів при плоскому напруженому стані, які представлені в роботах [1], [2] був створений програмний комплекс, який орієнтований на розв'язання задач статичної та динамічної повзучості плоских тіл, та в роботах [3], [4] проведено дослідження довготривалої міцності пластин з надрізами та встановлений час закінчення процесу прихованого руйнування.

Постановка задачі. Використаний у даних роботах метод розрахунку на повзучість та довготривалу міцність базується на сучасних уявленнях щодо повзучості й руйнування, включає досягнення континуальної механіки пошкоджень. Процеси накопичення мікропошкоджуваності при повзучості описуються співвідношеннями, які запропоновані Ю.Н. Работновим, Л.Н. Качановим. Для аналізу процесу накопичення мікропошкоджень й росту мікротріщин при повзучості застосовується параметр пошкоджуваності ω , який при розсіяних мікропошкодженнях приймається скалярною функцією координат точок тіла й часу $\omega = \omega(x, t)$. В період першої стадії – стадії прихованого руйнування ($0 \leq t < t_c$) у кожній точці тіла відбувається накопичення пошкоджуваності від $\omega(0) = 0$ до $\omega(t_c) \leq \omega_c$ (при цьому $\omega_c \cong 1$). В момент закінчення часу прихованого руйнування t_c у деякій точці тіла x_i виникає місцеве руйнування, тобто параметр пошкоджуваності набуває критичного значення: $\omega(x_i, t_c) = \omega_c$, процес накопичення розсіяних пошкоджень стає нестійким, розсіяні мікротріщини зливаються, виникають макропошкодження.

На основі вище описаного методу були виконані дослідження щодо перерозподілу напружено-деформованого стану, процесу накопичення прихованих пошкоджень та визначення часу прихованого руйнування внаслідок повзучості в пластині, які послаблені гострими та круговими симетричними надрізами, при статичному розтягуванні (рис. 1).

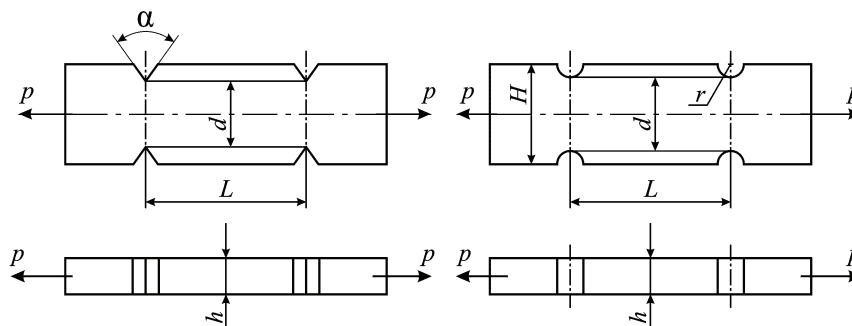


Рисунок 1 – Розрахункова схема

Досліджувалися прямокутні пластини з базовою довжиною $L = 12 \cdot 10^{-3}$ м, товщиною $h = 2,4 \cdot 10^{-3}$ м, з симетричними гострими надрізами глибиною

$t = 10^{-3}$ м та кутом надрізу $\alpha \div 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ при постійній ширині $H = 7,2 \cdot 10^{-3}$ м, а також з круговими надрізами радіуса $r = 10^{-3}$ м при різноманітних зна-

ченнях ширини пластини $H = 3,5 \cdot 10^{-3}$ м; $4,6 \cdot 10^{-3}$ м; $7,2 \cdot 10^{-3}$ м; $9,8 \cdot 10^{-3}$ м; $12,4 \cdot 10^{-3}$ м; $14,4 \cdot 10^{-3}$ м, які розтягнуті в напрямку, перпендикулярному лінії надрізів.

Зауважимо, що біля надрізів пластин при розтягу має місце концентрація напружень, величина якої при пружному деформуванні може бути окремо визначена за формулами Нейбера для гострих неглибоких надрізів й по відомим аналітичним рішенням для кругових надрізів. Розрахунками напруженого стану пластин при визначенні коефіцієнтів концентрації та порівнянні їх з відомими [6] встановлено достатній ступінь дискретизації розрахункових областей.

Рівняння стану. Розрахунки виконані для з титанового сплаву Ti-6Al-2Cr-2Mo, при температурі $T = 675$ °К (401,85 °С), модуль пружності $E = 1,2 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$, для якого рівняння стану при повзучості записуються у вигляді:

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_i = B \frac{\sigma_i^n}{(1-\omega)^n}; \\ \dot{\omega} = D \frac{\sigma_e^m}{(1-\omega)^m}; \\ 0 \leq \omega \leq \omega_c, \end{cases} \quad (1)$$

де $B = 0,138 \cdot 10^{-23}$ (МПа) $^{-n}$ 1/год., $D = 1,08 \cdot 10^{-20}$

(МПа) $^{-m}$ 1/год, $n = 6,8$; $m = 5,79$. Дані про фізико-механічні характеристики цього сплаву наведені в роботі [5].

Зазначимо, що еквівалентне напруження σ_e в кінетичному рівнянні (1) приймалося рівним:

$$\sigma_e = (1-\alpha)\sigma_i + \alpha \cdot \sigma_1, \quad (2)$$

де $\sigma_i = \left(\frac{3}{2} S_{i,j} S_{i,j} \right)^{\frac{1}{2}}$ – інтенсивність напружень Мізеса; σ_1 – максимальне головне напруження; α – число ($0 \leq \alpha \leq 1$), значення якого корегує величину еквівалентних напружень Мізеса ($\alpha = 0$) у відповідності з даними дослідів по руйнуванню матеріалів. У розрахунках приймалося $\alpha = 0,5$, тобто $\sigma_e = \frac{1}{2}(\sigma_i + \sigma_1)$, що відповідає критерію довготривалої міцності, який добре узгоджений з експериментальними даними [5].

Результати досліджень. Розрахунки на статичну повзучість з урахуванням пошкоджуваності пластин з гострими надрізами ($\alpha = 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$) при розтягуванні в осьовому напрямку статичним навантаженням $P = P_0 = 400$ МПа ($\sigma_{ном} = 600$ МПа; $\sigma_{прикл} = 433$ МПа) показали, що збільшення кута надрізу в розглянутих випадках суттєво впливає як на змінення рівня максимальних еквівалентних напружень в період прихованого руйнування, так і на час закінчення періоду прихованого руйнування t_c (табл. 1).

Таблиця 1 – Вплив кута надрізу на міцність пластини

Кут надрізу	Максимальні еквівалентні напруження в момент $t = 0$	Еквівалентні напруження в момент завершення прихованого руйнування	Коефіцієнт концентрації напружень $K = \frac{\sigma_e^{\max}}{\sigma_{ном}}$	Час закінчення періоду прихованого руйнування t_c
$\alpha = 50^\circ$	$\sigma_e^{\max}(0) = 1328$ МПа	$\sigma_e(t_c) = 255$ МПа	$K = 2,2$	$t_c = 160$ годин
$\alpha = 60^\circ$	$\sigma_e^{\max}(0) = 1257$ МПа	$\sigma_e(t_c) = 171$ МПа	$K = 2,096$	$t_c = 191$ година
$\alpha = 70^\circ$	$\sigma_e^{\max}(0) = 1240$ МПа	$\sigma_e(t_c) = 162$ МПа	$K = 2,085$	$t_c = 198$ годин

Таблиця 2 – Дослідження повзучості пластин

r/d	$H \cdot 10^{-3}$, м	$\sigma_{пот}$, МПа	$\sigma_e^{\max}(0)$, МПа	$\sigma_e(t_c)$, МПа	$K = \sigma_e^{\max}/\sigma_{пот}$	t_c , г
1/1,5	3,5	933,3	1077,3	350,2	1,179	330
1/2,6	4,6	707,6	1157,3	83,0	1,669	336
1/5,2	7,2	553,8	1113,6	31,8	2,05272	524
1/7,8	9,8	502,5	1133,5	23,8	2,302	516
1/10,4	12,4	470,9	1164,6	15,8	2,4929	504
1/12,4	14,4	464,5	1182,9	7,5	2,599	496

На основі одержаних результатів можна зробити висновок про те, що чим менший кут гострого надрізу, тим вищий рівень максимальних напружень біля контуру надрізу й, як наслідок, більше коефіцієнт концентрації напружень $K = \frac{\sigma_e^{\max}}{\sigma_{ном}} = 2,2; 2,096; 2,085$

та менший період прихованого руйнування $t_c = 160; 191; 198$ годин відповідно.

Дослідження повзучості пластин, які розтягнуті напруженням 400 МПа, з різним співвідношенням радіусу кругового надрізу r до відстані між надрізами d ($d = H - 2r$), доводить, що в пластинах с різним значенням r/d суттєвим чином відрізняються не тільки процеси перерозподілу напружень, а й накопичення

пошкоджуваності, та як наслідок, значення часу прихованого руйнування t_c (табл.2).

Можна зробити наступний висновок, що чим більша відстань між контурами кругових надрізів $d = H - 2r$, тим менший рівень номінальних напружень, та як наслідок, більший коефіцієнт концентрації напружень біля контуру вирізу $\left(K = \frac{\sigma_y^{\max}}{\sigma_{ном}} \right)$. Однак,

найменший час $t_c = 330$ г серед розглянутих співвідношень r/d у пластини с найменшою шириною $H = 3,5 \cdot 10^{-3}$ м при найменшому коефіцієнті концентрації напружень. Цей факт пояснюється наступним: при конкретному співвідношенні величин радіуса надрізу й ширини пластини надріз не є концентрато-

ром, ми маємо пластину зі складною геометрією. Як наслідок, має місце принципово інше розподілення напружень в пластині, у порівнянні з пластиною з концентратором.

Зі збільшенням ширини пластини $H = 7,2 \cdot 10^{-3}$ м, або відстані між контурами кругових надрізів – $d > 5,2 \cdot 10^{-3}$ м, спостерігається зростання концентрації напружень й зменшення часу прихованого руйнування (см. табл. 2), так як тут надрізи є концентраторами.

Пластини з гострим надрізом ($\alpha = 60^\circ$, $H = 7,2 \cdot 10^{-3}$ м) та круговим надрізом ($r = 10^{-3}$ м, $H = 7,2 \cdot 10^{-3}$ м) чисельно та експериментально вивчались раніше у роботі [5]. За результатами розрахунків напруженого стану та часу прихованого руйнування проведено порівняння даних та встановлена цілком прийнятна їх відповідність: по напруженням максимальна різниця не перевищує 15 %, значення часу прихованого руйнування відрізняються неістотно: 191 г та 200 г для гострого надрізу й 524 г та 570 г для кругового надрізу.

Час повного руйнування розглянутих пластин значно вищий ніж час їх прихованого руйнування t_c . У цій же роботі [5] автори наводять експериментальні дані часу повного руйнування пластин, які вивчаються. Їх значення дорівнюють $t_{cr} = 1760$ г (гострий надріз) та $t_{cr} = 2120$ г (круговий надріз), що значно перевищує час прихованого руйнування t_c . Тому розробка методів визначення часу між завершенням стадії прихованого руйнування конструктивного елемента та моментом його повного руйнування є актуальною щодо досліджень повзучості та оцінки ресурсу роботи різноманітних деталей машин.

Далі у роботі будуть запропоновані підходи щодо визначення часу повного руйнування внаслідок повзучості пластин з надрізами.

Чисельний аналіз розповсюдження фронту руйнування в пластинках з надрізами. В роботі запропоновано метод чисельного аналізу розповсюдження фронту руйнування на прикладі пластин з надрізами.

Чисельне дослідження розвитку макротріщин в конструктивних елементах при повзучості виконати досить важко. Наближений опис процесу макроруйнування при $t > t_c$ можна виконати зберігаючи схему розсіяного руйнування шляхом введення фронту руйнування, який рухається. Приймається, що в момент завершення прихованого руйнування в окремій області тіла, де параметр пошкоджуваності досяг свого критичного значення $\omega = \omega_c$, виникає фронт руйнування: нестійкі мікропошкодження зливаються в макропошкодження – дрібні тріщини, які ймовірно мають розсіяний характер. У подальшому руйнування йде переважно внаслідок росту магістральних тріщин. Таке тріщиноутворення продовжує процес руйнування й завершується повним руйнуванням пластини. Час повного руйнування t_{cr} наближено можна визначити вивчаючи розвиток тріщиноутворення в тілі після завершення стадії прихованого руйнування в момент часу t_c . При цьому:

$$t_{cr} = t_c + t_{fr}, \tag{3}$$

де t_{fr} – час розповсюдження фронту руйнування.

Розглянемо прямокутну пластину с симетричними неглибокими надрізами при розтягненні силами, які діють перпендикулярно до лінії надрізів.

Вище було зазначено, що в вершинах надрізів має місце концентрація напружень та суттєва неоднорідність напружено-деформованого стану, який по мірі віддалення від вершини надрізу переходить в однорідний напружений стан, який відповідає розтягнутій пластині без надрізів або несуттєво відрізняється від нього у випадку глибокого надрізу. При повзучості первісний пружний стан пластини змінюється внаслідок повзучості.

Розрахунки доводять, що напружений стан суттєво перерозподіляється, причому таким чином, що максимальні напруження можуть значно знизитися (концентрація слабшає), однак область неоднорідності напруженого стану збільшується. Відмічені ефекти залежать від матеріалу, його здібності до релаксації, рівня напружень та температури. В результаті параметр пошкоджуваності досягає свого максимального значення, як правило, не в вершині надрізу, а на деякій відстані від неї. Таким чином, для неоднорідного поля напружень маємо:

$$\omega = \omega(x, t), \quad \sigma_e = \sigma_e(x, t),$$

де t – час ($t > 0$), x – координата точки з області неоднорідності напруженого стану, σ_e – еквівалентні напруження (2).

Вводимо пряму x_1 , яка нормальна до лінії надрізу та проходить через точку пластини, у якій $\omega(x_1^*, t_c) = \omega_c$. Внаслідок симетрії пластини відносно лінії надрізу можна вважати, що ця лінія проходить через дві точки x_1^* , $x_2 = \pm x_{2^*}$, де x_{2^*} – значення координати x_2 точки, в якій параметр пошкоджуваності в момент завершення прихованого руйнування досягає критичного значення ω_c (рис. 2). Будемо вважати, що лінія, яка розглядається, фіксує начало фронту руйнування, який буде просуватися вздовж лінії надрізів внаслідок повзучості й продовження процесу руйнування.

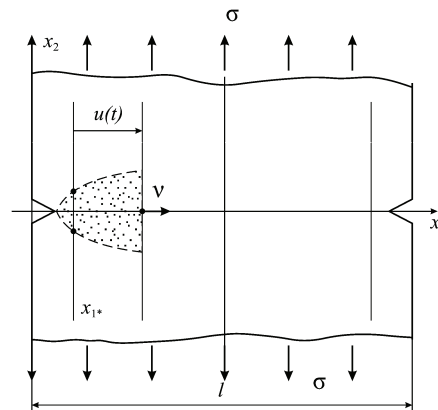


Рисунок 2 – Розповсюдження фронту руйнування в пластинках з надрізами

Нехай у деякий момент часу t , який відраховується від t_c , який приймається за начало виникнення

фронту руйнування, лінія фронту змістилась в положення $x_1(t) = x_{1*} + u(t)$, де $u(t)$ – параметр фронту, нормаль до якого v співпадає з направленням координатної осі x_1 . Траєкторія розповсюдження тріщиноутворення на рис. 2 показана пунктирною лінією.

Розглянемо тріщиноутворення внаслідок повзучості на основі описання руху прямої, яка не має товщини та розділяє зруйновану та незруйновану області матеріалу. Знов скористаємося параметром пошкоджуваності $\omega(x,t)$, для якого кінетичне рівняння має вигляд (1) й запишемо критерій пошкоджуваності на фронті руйнування таким чином:

$$\omega(t, x_*) = \omega_*, \quad (4)$$

де $x_*(x_{1*} + u(t), x_{2*}(t))$ – координати, які визначають положення фронту руйнування. З урахуванням прийнятого критерію (4) отримаємо наступну інтегральну умову відносно параметру фронту руйнування $u(t)$ для точок, які належать фронту:

$$[1 - \omega_c(u(\tau))]^{m+1} = (n+1) \int_0^\tau B \cdot \sigma_e^m(\tau', u(\tau)) d\tau', \quad (5)$$

де прийняті наступні позначення:

$$\omega_c(u(\tau)) = \omega(t_c, x_{1*} + u(\tau), x_{2*}(t_c)) \quad (6)$$

– розподілення пошкоджуваності, яка розрахована в момент t_c , в пластині вздовж координати x_1 , яка нормальна до лінії фронту; $0 \leq \tau \leq t_{fr}$ – час розповсюдження фронту руйнування; $\sigma_e(\tau', u(\tau))$ – еквівалентні напруження, які змінюються з часом $0 \leq \tau' \leq \tau$, внаслідок повзучості й тріщиноутворення. В подальшому будемо нехтувати ефектом впливу «внутрішнього» часу τ' на розподіл σ_e , наближено приймаючи, що за час $0 \leq \tau' \leq \tau$:

$$\sigma_e(\tau', u(\tau)) \cong \sigma_{ec}(t_c, x_{1*} + u(\tau), x_{2*}(t_c)), \quad (7)$$

де $\sigma_{ec} = \sigma_{ec}(u(\tau))$ – розподілення еквівалентних напружень, яке розраховане в момент t_c , в пластині вздовж координати x_1 , нормальної до лінії фронту. Таке припущення для багатьох практичних випадків досить припустимо. З урахуванням прийнятого переписемо інтегральну рівність (5) наступним чином:

$$[1 - \omega_c(u(\tau))]^{m+1} = (n+1) \int_0^\tau B \cdot \sigma_{ec}^m(u(\tau)) d\tau. \quad (8)$$

Після диференціювання за часом рівняння (8), приходимо к другому формулюванню умов для точок, які лежать на фронті:

$$\frac{du}{d\tau} = - \frac{B \cdot \sigma_{ec}^m(u(\tau))}{(1 - \omega(u(\tau)))^m} \frac{1}{du}; \quad (9)$$

$$u(0) = 0, u(t_{fr}) = u_*, \quad (10)$$

де t_{fr} – час розповсюдження фронту руйнування вздовж x_1 ; u_* – граничне значення, на величину якого фронт може розповсюдитись в пластині с надрізом. У

розглянутому випадку $u_* = \frac{H}{2} - x_{1*}$.

Зазначимо, що з (9) випливає, що у випадку од-

норідного напруженого стану – $\frac{d\omega_c}{du} = 0$, фронт руйнування розповсюджується миттєво.

Далі розглянемо методи чисельного аналізу щодо розповсюдження тріщиноутворення внаслідок повзучості, які базуються на інтегруванні рівняння для параметра $u(\tau)$ у вигляді (9). У цьому випадку маємо початкову задачу щодо визначення $u(\tau)$ як вирішення звичайного диференціального рівняння, та визначення t_{fr} з останнього рівняння системи (9) – (10). Для інтегрування рівняння використовувався метод чисельного інтегрування Рунге-Кутта-Мерсона с автоматичним вибором шагу інтегрування за заданою (варійованою в розрахунках) точністю $\varepsilon = \delta \cdot u_*$, де $\delta = 10^{-5} \dots 10^{-8}$. Для інтерполяції величин, які входять до правої частини рівняння (9) – ω_c и σ_{ec} , використовувалася кусочно-квадратична інтерполяція, а похідна $\frac{d\omega_c}{du}$ визначалась за інтерполяційними формулами аналітично. При цьому сітки триангуляції й інтерполяції при розрахунках узгоджувались.

На рис. 3 проілюстровано розповсюдження фронту тріщини в пластинках з гострими надрізами, а на рис. 4 – з круговими надрізами.

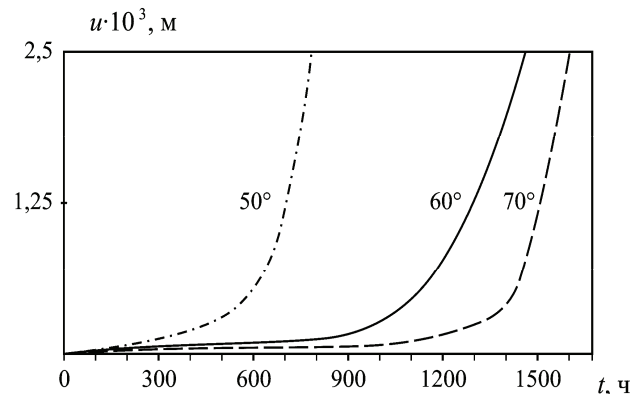


Рисунок 3 – Розповсюдження фронту тріщини в пластинках з гострими надрізами

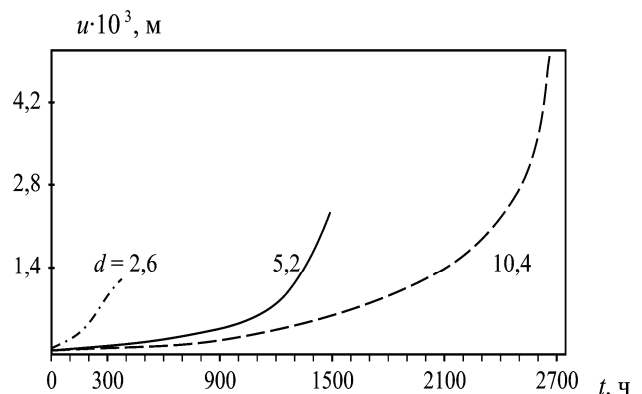


Рисунок 4 – Розповсюдження фронту тріщини в пластинках з круговими надрізами

Таким чином, сформульована задача про повзучість пластини з надрізами з урахуванням макропошкоджуваності зводиться до визначення напружено-

деформованого стану розглянутих пластин до моменту завершення стадії прихованого руйнування t_c та визначення часу розповсюдження фронту руйнування t_{fr} . Повний час руйнування t_{cr} можна визначити за формулою (3).

Решение первой задачи, изложенное в разделе 3.3, позволяет определить распределения напряженно-деформированного состояния и параметра повреждаемости в произвольный момент времени, и в частности, в момент времени t_c , когда впервые в точках элементов пластины достигается равенство $\omega = \omega_*$. Последнее позволяет определить распределения $\omega_c = \omega(t_c, x_1, x_2)$ повреждаемости и эквивалентного напряжения вдоль координаты x_1 , в направлении которой предполагается продвижение фронта разрушения. Указанные распределения представляются в дискретном виде и подсчитываются по данным напряженно-деформированного состояния в точках с координатами центра тяжести элементов. Последним устанавливается прогнозируемая траектория распространения трещинообразования, которая условно на рис.2 показана пунктирной кривой.

Порівняльні дані розрахункових значень часу руйнування (t_c, t_{fr}, t_{cr}) внаслідок повзучості розтягнутих пластин з різноманітними надрізами й співвідношеннями конструктивних параметрів надані в табл. 3, а окремі результати співставленні з експериментальними даними часу повного руйнування містяться у літературі [5].

В аналогічній постановці задача про руйнування пластин с надрізами розглядалась в роботі [5], де показано, що тривалість руйнування в умовах неоднорідності напруженого стану внаслідок концентрації напружень біля надрізів може бути досить значною, що підтверджується експериментальними даними. В табл. 4 окремо надано співставлення даних, які отримані у даній роботі ($\alpha = 60^\circ$; $H = 7,2 \cdot 10^{-3}$ м та $\frac{r}{d} = \frac{1}{5,2}$; $H = 7,2 \cdot 10^{-3}$ м), з розрахунковими й експериментальними даними [5]. Ці результати доводять достатньо добру їх відповідність, що підтверджує достовірність запропонованих в роботі методів та алгоритмів розрахунку повзучості й руйнування плоских тіл, зокрема, пластин с надрізами.

Таблиця 3 – Порівняльні дані розрахункових значень часу руйнування (t_c, t_{fr}, t_{cr}) внаслідок повзучості розтягнутих пластин з різноманітними надрізами й співвідношеннями конструктивних параметрів

Тип надрізу	Конструктивні параметри ($r = t = 10^{-3}$ м)	Час руйнування, год.			Експеримент
		Прихованого руйнування t_c	При розповсюдженні фронту t_{fr}	Повне t_{cr}	
Кругові надрізи	$\frac{r}{d} = 1/2,6$	336	337	673	2120
	$\frac{r}{d} = 1/5,2$	524	1482	2006	
	$\frac{r}{d} = 1/10,4$	504	2663	3167	
Гострі надрізи	$\alpha = 50^\circ$	160	789	949	1760
	$\alpha = 60^\circ$	191	1428	1619	
	$\alpha = 70^\circ$	198	1577	1775	

Таблиця 4 – Співставлення даних, які отримані у даній роботі, з розрахунковими й експериментальними даними

Тип надрізу	Вид даних	Час руйнування, год.		
		Прихованого руйнування t_c	Розповсюдження фронту руйнування t_{fr}	Повне руйнування t_{cr}
Круговий надріз $\frac{r}{d} = \frac{1}{5,2}$ $H = 7,2 \cdot 10^{-3}$ м	Розрахунки даної роботи	524	1482	2006
	<i>J. Walczak</i> <i>J. Sienawski</i>	570	1140	1710
	Експеримент	–	–	2120
Гострий надріз $\alpha = 60^\circ$ $H = 7,2 \cdot 10^{-3}$ м	Розрахунок даної роботи	191	1428	1419
	<i>J. Walczak</i> <i>J. Sienawski</i>	200	1400	1600
	Експеримент	–	–	1760

Висновки. В роботі наведені розрахункові значення часу прихованого руйнування t_c , часу розповсюдження фронту руйнування t_{fr} та часу повного руйнування t_{cr} при розтягуванні пластин з різними типами надрізів й співвідношеннями конструктивних параметрів у порівнянні з експериментальними даними.

Встановлено, що тривалість повного руйнування пластин в умовах неоднорідного напруженого стану внаслідок концентрації напружень біля надрізів може бути досить значною. При цьому для деяких співвідношень параметрів кругових надрізів t_{fr} більш ніж t_c у чотири рази, а для гострих надрізів – у вісім разів.

Практична цінність запропонованого методу

полягає в можливості оцінити ресурс різноманітних деталей машин, в яких закінчився період прихованого накопичення пошкоджень й виникли макро-руйнування.

Список літератури: 1. Морачковский О.К. О нелинейных задачах ползучести тел при воздействии быстро осциллирующего поля / О.К. Морачковский // Прикладная механика. – 1992. – Т. 28, № 8. – С. 17-23. 2. Анищенко Г.О. Ползучесть и повреждаемость в телах при плоском напряженном состоянии / Г.О. Анищенко, Д.В. Бреславский // Динамика и прочность машин. Респ. межвед. н.-т. сборник. – Х.: ХГПУ. – 1997. – Вып. 55. – С. 23–32. 3. Анищенко Г.О. Влияние циклического нагружения на ползучесть и длительную прочность пластины с отверстиями / Г.О. Анищенко, Д.В. Бреславский, О.К. Морачковский // Доповіди

Національної академії наук України. – 1998. – № 8. – С. 59–64. 4. *Аніщенко Г.О.* Повзучість та руйнування пластин з надрізами в умовах циклічного навантаження / *Г.О. Аніщенко* // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин. – Х: НТУ «ХПІ» 2013. – № 58 (1031). – С. 16–23. 5. *Walczak J.* On the analysis of creep stability and rupture / *J. Walczak, J. Sieniawski, K. Bathe* // Computers & structures. – 1983. – Vol. 17, № 5-6. – P. 783–792. 6. *Савин Г.М.* Довідник з концентрації напружень / *Г.М. Савин, В.І. Тульчій*. – К.: Вища школа, 1976. – 412 с.

Bibliography (transliterated): 1. Morachkovskij O.K. O nelinejnyh zadachah polzuchesti tel pri vozdejstvii bystro oscilliruyushchego polya. O.K. Morachkovskij. Prikladnaya mehanika. 1992. Vol. 28, No 8. 17-23. Print. 2. Anischenko G.O. Polzuchest' i povrezhdaemost' v telah pri ploskom napryazhennom sostoyanii.

G.O. Anischenko, D.V. Breslavskij. Dinamika i prochnost' mashin. Resp. mezhved. n.-t. sbornik. Kharkiv: KhGPU. 1997. Vol. 55. 23–32. Print. 3. Anischenko G.O. Vliyanie ciklicheskogo nagruzheniya na polzuchest' i dlitel'nyuyu prochnost' plastiny s otverstiyami. G.O. Anischenko, D.V. Breslavskij, O.K. Morachkovskij. Dopovidi Nacional'noyi akademiyi nauk Ukrayiny. 1998. No 8. 59–64. Print. 4. Anishchenko H.O. Povzuchist' ta rujnuvannya plastyn z nadrizamy v umovakh cyklichnoho navantazheniya. H.O. Anishchenko. Visnyk NTU "KhPI". Zbirnyk naukovykh prac'. Seriya: Dynamika i micnist' mashyn. Kharkiv: NTU "KhPI" 2013. No 58 (1031). 16–23. Print. 5. Walczak J. On the analysis of creep stability and rupture. J. Walczak, J. Sieniawski, K. Bathe. Computers & structures. 1983. Vol. 17, No 5-6. 783–792. Print. 6. Savyn H.M. Dovidnyk z koncentraciyi napruzhen'. H.M. Savyn, V.I. Tul'chij. Kyiv: Vyshcha shkola, 1976. 412. Print.

Надійшла (received) 15.04.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Аніщенко Галина Оттівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри Теоретичної механіки, Національний технічний університет «ХПІ»; тел.: 707-63-73

Anischenko Galina Ottivna, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent of the Department of Engineering Mechanics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: 707-63-73

УДК 534.1 : 539.3

К. В. ВАКУЛЕНКО; И. Б. КАЗАК; С. Ю. СОТРИХИН; В. Г. ЯРЕЩЕНКО

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА НА ЕГО ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В работе рассмотрены вопросы практического определения надежности конструкции посредством метода контроля степени деградации структуры материала в процессе эксплуатации. Статья посвящена использованию тензометрического метода для выявления зарождения усталостных трещин докритических размеров в сталях и элементах несущих конструкций. Инструментальный метод позволяет уменьшить затраты на проведение опытной эксплуатации конструкций с продолженным изначально назначенным сроком службы. Экспериментальные данные, полученные методами тензорегистрации и фиксации отскока металлического шарика хорошо согласуются между собой.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение, ударное нагружение, тензометрия, деформация.

Введение. Определение остаточного ресурса элементов конструкций, выполненных из различных сталей представляет большой практический интерес. Важным фактором, влияющим на прочность элемента конструкции, является состояние его поверхности. Поверхностное упрочнение позволяет создать в поверхностном слое материала такое структурное состояние, которое повышает сопротивление зарождению усталостных трещин, препятствует (или затрудняет) накопление, движение и выход на поверхность дефектов кристаллического строения материала. Состояние поверхности можно исследовать при помощи различных известных способов. Одним из таких способов неразрушающего контроля для оценки качества материалов конструкций является метод широкополосного электротензометрирования [1, 2].

Состояние научной проблемы. Наличие эффективного метода контроля степени деградации струк-

туры материала в процессе эксплуатации является важным вопросом практического определения надежности конструкции. Для контроля работоспособности готового изделия необходимо применять методы неразрушающего контроля. Использование метода динамической широкополосной тензометрии эффективно наряду с методами рентгенокопии, измерением магнитных характеристик и другими. Этот метод в настоящее время является одним из наиболее изученных и надежных [3, 4].

Цель работы. Целью работы было экспериментальное исследование влияния состояния поверхностного слоя образцов на распространение в них волн деформации.

Постановка эксперимента. Из прямоугольных заготовок стали 14X17H2 размером 180x50x6 мм были изготовлены образцы в соответствии с эскизом

© К. В.Вакулenco; И. Б.Казак; С. Ю.Сотрихин; В. Г. Ярещенко, 2015