

УДК 539.375

МІКРОМЕХАНІЗМИ І РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ РОСТУ ТРІЩИН НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОВЗУЧОСТІ В МАТЕРІАЛАХ

О. Є. АНДРЕЙКІВ¹, В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ^{2, 3}, Ю. Я. МАТВІЙ³,
І. Я. ДОЛІНСЬКА²

¹ Львівський національний університет ім. Івана Франка;

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

³ Луцький національний технічний університет

Проаналізовано і синтезовано відомі у літературі результати досліджень мікромеханізмів росту тріщин повзучості та на підставі цього показано, що вони, в основному, ростуть шляхом зародження, збільшення і об'єднання пор. Це покладено в основу формулювання розрахункової моделі для визначення періоду докритичного росту тріщин низькотемпературної повзучості в конструкційних матеріалах. В результаті отримано кінетичне рівняння росту таких тріщин як залежність швидкості від коефіцієнта інтенсивності напружень. Це рівняння разом з початковими і кінцевими умовами становить розрахункову модель для визначення періоду докритичного росту тріщин низькотемпературної повзучості.

Ключові слова: *низькотемпературна повзучість, мікромеханізми поширення тріщин повзучості, розрахункова модель, докритичний ріст тріщини, зона передруйнування.*

Щоб побудувати розрахункові моделі руйнування твердих тіл за низькотемпературної повзучості, в першу чергу, потрібно розглянути мікромеханізми деформування і руйнування їх матеріалів під довготривалим статичним навантаженням. Ці мікромеханізми для багатьох металевих матеріалів мають спільні, а в деяких випадках і відмінні ознаки. В літературі відома низка досліджень мікромеханізмів деформування і руйнування матеріалів (особливо металевих) за довготривалого статичного навантаження. Нижче проаналізовано і синтезовано результати [1–7] для металевих матеріалів і їх сплавів.

Мікромеханізми локального деформування та руйнування металів і сплавів за повзучості. За довготривалого розтягу і зсуву полікристалічних матеріалів на субмікроскопічному рівні спостерігають переважно такий розподіл дислокацій: окремі дислокації, їх сплетіння і границі субзерен. За повзучості можна спостерігати як внутрішньозеренну деформацію, так і деформацію на границях зерен (проковзування) [1–7].

Внутрішньозеренна деформація повзучості може бути різних типів, зокрема за механізмом одинарного тонкого, множинного і поперечного ковзання. В полікристалічних матеріалах внаслідок різної орієнтації зерен може проходити складне пластичне деформування. Так, у праці [1] наведені приклади деформування алюмінію під час повзучості за різних температур (рис. 1). За температури 20°C і довготривалого статичного розтягу алюмінію спостерігали велику густину смуг ковзання, що носить множинний характер (рис. 1a). Збільшення температури до 150°C (рис. 1b) призводить до зменшення густини і збільшення віддалі між ними. На рис. 1b видно, що за подальшого збільшення температури до 200°C смуг ков-

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

зання стає ще менше, але з'являються смуги деформацій і субзерна. За температури 300°C смуг ковзання не видно (рис. 2а), однак виникають лінії тонкого ковзання. При цьому границі зерна потовщуються, що свідчить про значне проковзування по границях і мігрування границь зерен.

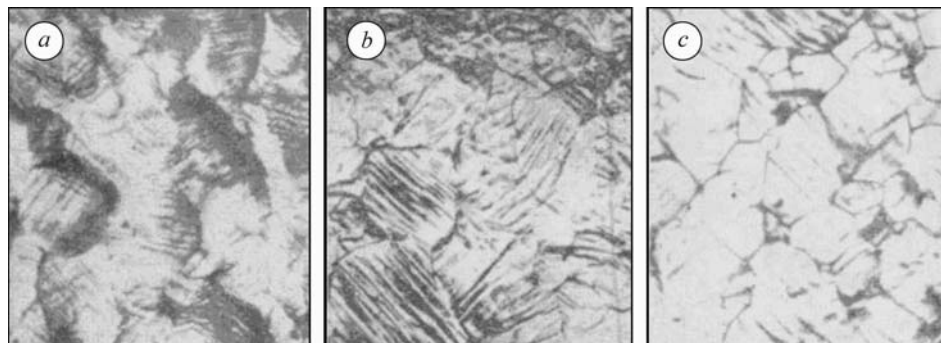


Рис. 1. Неоднорідна деформація в алюмінії і густина смуг ковзання за довготривалого розтягу і температури 20°C (а); зменшення смуг ковзання в алюмінії зі збільшенням температури до 150°C (б); поява грубих смуг ковзання і субзерен за довготривалого розтягу алюмінію при 200°C (с). ×60.

Fig. 1. Nonhomogeneous deformation in aluminum and slip bands density under long-term tension and at a temperature of 20°C (a); reduction of slip bands in aluminum under temperature increase up to 150°C (b); the appearance of coarse slip bands and subgrains under long-term tension of aluminum at a temperature of 200°C (c). ×60.

Рис. 2. Потовщення границь зерен і сліди внутрішньозеренної деформації в алюмінії за довготривалого розтягу і температури 300°C (а); проковзування по границях зерен у полікристалічному магнії (б) [1]. ×60.

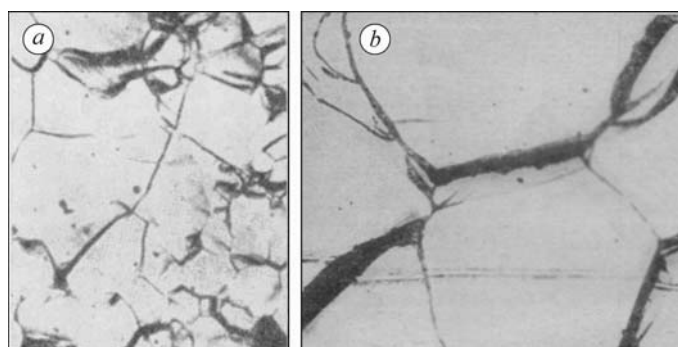


Fig. 2. Thickening of grain boundaries and traces of deformation in an aluminum grain for long-term tension and at a temperature of 300°C; slip along the grain boundaries in polycrystalline magnesium (b) [1]. ×60.

Поряд з внутрішньозеренною деформацією в металах і сплавах за повзучості проходить деформування по границях зерен – зернограничне проковзування (рис. 2). Найчастіше воно відбувається у полікристалічних матеріалах за температури вищої, ніж $0,3 T_{\text{mp}}$ (T_{mp} – температура плавлення). Зазначимо, що зернограничне проковзування має з часом циклічний характер і зростає зі збільшенням напруження, температури та розміру зерен [1]. У полікристалах проковзування утруднене на стиках трьох зерен і вздовж границь не рівномірне, а тому на такому стику виникають деформаційні складки, що, в свою чергу, призводить до утворення клиновидних тріщин (рис. 3а). Вони звичайно утворюються на стиках трьох зерен і поширюються у напрямку їх границь, перпендикулярних до осі прикладання напруження [7].

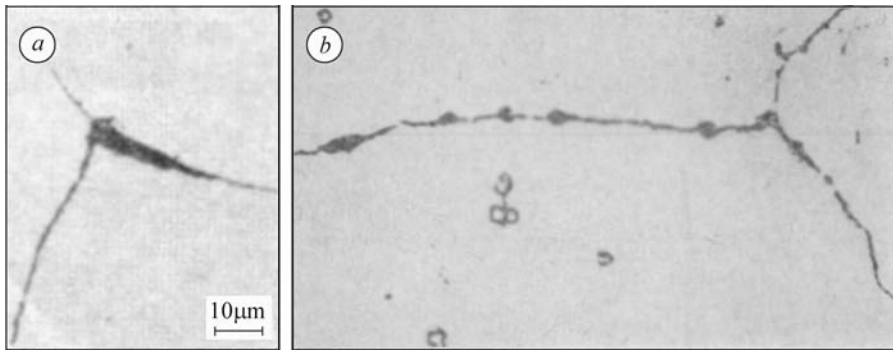


Рис. 3. Клиновидні тріщини в аустенітній сталі за температури 593°C (a) і круглі пори на границях зерен сплаву німонік 80А за температури 750°C (b) [1]. $\times 320$.

Fig. 3. Wedge-shaped cracks in austenitic steel at 593°C (a) and round pores at the grain boundaries of the Nimonic 80A alloy at 750°C (b) [1]. $\times 320$.

Якщо ці тріщини досягнуть довжини границі одного зерна, то вони тоді виглядають як пустоти (рис. 2). Поряд з цим на границях зерен можуть виникати тріщини другого типу – круглі (рис. 3b). Переважно клиновидні тріщини утворюються за низьких температур і високих напружень, а круглі пустоти (пори) – в області високих температур і низьких напружень [1]. Зернограничне проковзування сприяє не тільки виникненню клиновидних тріщин, але і пустот.

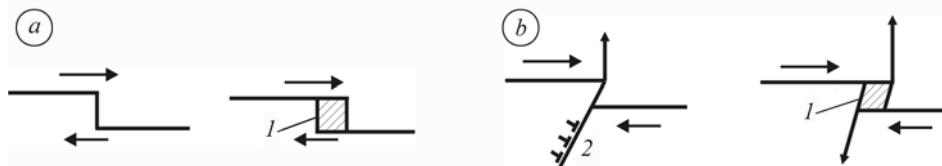


Рис. 4. Механізми утворення мікропустот: a – модель Чена–Махліна; b – модель Гіфкінса–Махліна; 1 – порожнина; 2 – лінія ковзання [7].

Fig. 4. Mechanism of microvoids formation: a – Chen–Macklin model; b – Gifkins–Macklin model; 1 – cavity 2 – slip line [7].

Показано схеми (рис. 4), побудовані на моделях Чена–Махліна і Гіфкінса–Махліна, утворення пустот в результаті зернограничного проковзування в тому місці, де є сходинка на границі зерна [7]. За моделлю Чена–Махліна ця сходинка є на початку процесу, а за моделлю Гіфкінса–Махліна – вона утворюється під час повзучості за рахунок перетину лінією проковзування границі зерна.

Інший механізм виникнення і росту пори на сходинці границі зерна описано у праці [6], де вважають, що зародження і пластичний ріст пори проходить за механізмом взаємодії зустрічних дислокаційних скупчень (рис. 5).

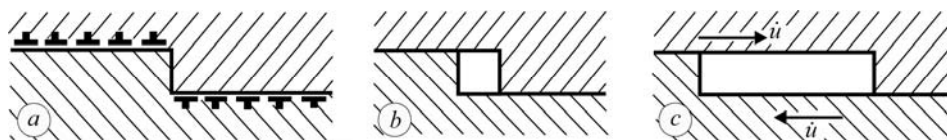


Рис. 5. Схеми дислокаційного зародження (a, b) і пластичного росту (c) пори на сходинці границі зерна.

Fig. 5. Schemes of dislocation initiation (a, b) and plastic growth (c) of pores on the border line of the grain.

Разом з тим, механізм росту пор можна описати за моделлю коалесценції вакансій (рис. 6). Для того, щоб вакансії спричинили зростання пор, необхідний неперервний їх притік із тіла зерна.

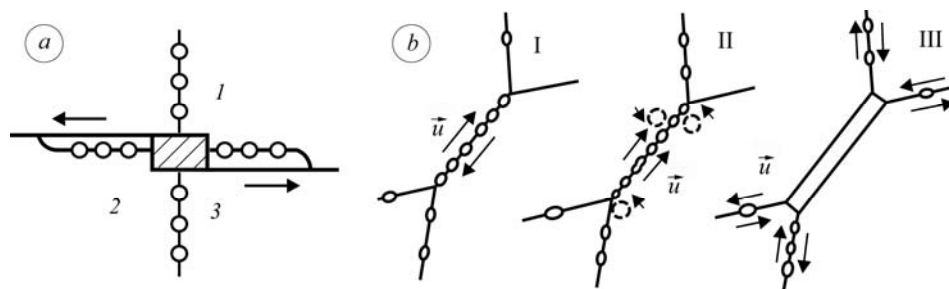


Рис. 6. Модель коалесценції вакансій, що спричинюють зародження (*a*: 1 – вакансії з тіла зерна; 2 – вакансії з границь зерен; 3 – зернограничне проковзування) та ріст пор (*b*: I – зародження пор на границі зерна; II – їх пластичний ріст; III – утворення мікротріщини і її розвиток за рахунок міжзеренного проковзування) на границі зерен [7].

Fig. 6. Model of vacancies coalescence, which causes the initiation (*a*: 1 – vacancies from grain body; 2 – vacancies from grain boundaries; 3 – grain-boundary slip) and growth of pores (*b*: I – pores initiation at the grain boundary; II – their plastic growth; III – microcrack formation and its growth due to the intergranular slip) at the grain boundaries [7].

На рис. 7 зображена схема зародження і росту пор на міжзеренній границі шляхом об'єднання одиночних пор по границі проковзування. Можливий механізм такого об'єднання описаний у праці [6]. Суть його така. Нехай на лінії проковзування у вихідному стані є дві пори. Якщо зсувні напруження досить малі, то пластичні зони біля них можна вважати незалежними (рис. 7*a*). Зі збільшенням дотичного напруження τ пластичні зони від сусідніх пор зливаються і дислокаційні заряди в них анігілюють (рис. 7*b*). Внаслідок цього загальний опір пластичній деформації біля пор зменшується і зовнішні пластичні зони ростуть. За подальшого підвищення напруження пластична деформація в перемичці збільшується і дислокаційні заряди в ній або не виникають зовсім, або мають протилежний знак порівняно з початковим (рис. 7*c*). Пластична деформація збільшує концентрацію напружень у перемичці між порами, що кінцево призводить до її розриву (рис. 7*d*). Для практичної реалізації зрізу перемички необхідно, щоб зсув по лінії ковзання між порами був достатньо великим.

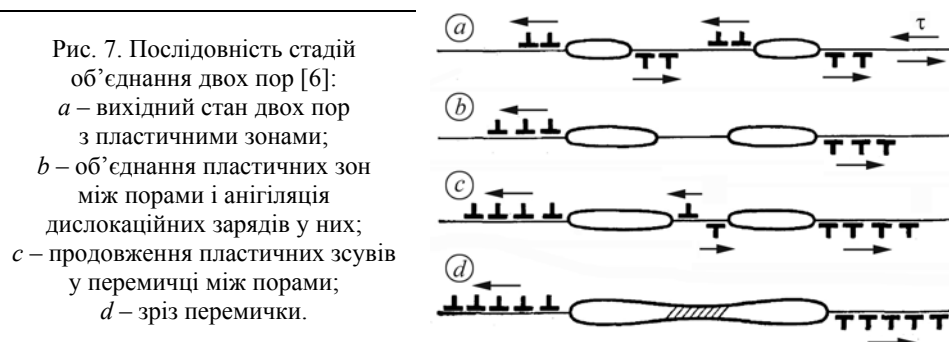


Рис. 7. Послідовність стадій об'єднання двох пор [6]: *a* – вихідний стан двох пор з пластичними зонами; *b* – об'єднання пластичних зон між порами і анігіляція дислокаційних зарядів у них; *c* – продовження пластичних зсувів у перемичці між порами; *d* – зріз перемички.

Fig. 7. Sequence of stages of two pores coalescence [6]: *a* – initial state of two pores with plastic zones; *b* – combining of plastic zones between pores and dislocation annihilation of charges in them; *c* – continued plastic displacements in the membrane between pores; *d* – membrane cut.

Поширення тріщини за механізмом повзучості пов'язане зі значними пластичними деформаціями в пластичній зоні біля її вершини, де тензор напружень

носить кульовий характер [6]. Тоді за усестороннього розтягу відбувається інтенсивний пластичний ріст пор. Отже, в пластичних зонах, де дислокаційні мікротріщини перетворюються в пори, останні мають можливість рости, причому експоненціально швидко [6]. Цим пластична зона біля вершини тріщини принципово відрізняється від іншої частини твердого тіла, в якій розмір більшості пор залишається сталим.

Під час навантаження зразка з макротріщиною і системою мікропор у плоскій пластичній зоні біля її вершини (рис. 8) відбувається пружне зміщення поверхонь тріщини та пластична деформація перемичок між порами, що спричиняє їх пластичний ріст. Напруження розтягу після досягнення границі текучості концентруються на перемичках між порами, зокрема зменшуються біля вершини тріщини і збільшуються в кінці пластичної зони [6].

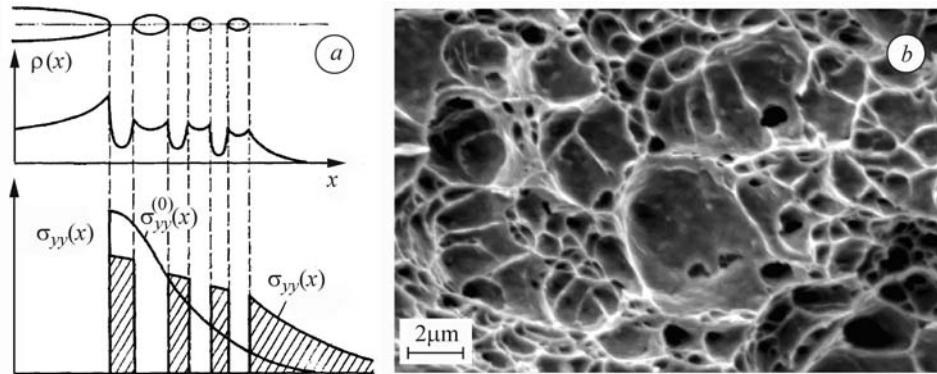


Рис. 8. Вплив пор і пластичної деформації в пластичній зоні біля вершини тріщини на розподіл у ній напружень [6] (а: схема розподілу пор; зміна функції густини $\rho(x)$ розколювальних дислокацій та зміна напружень розтягу в пластичній зоні від $\sigma_{yy}^{(0)}(x)$ до $\sigma_{yy}(x)$, де площі, обмежені $\sigma_{yy}^{(0)}(x)$ і $\sigma_{yy}(x)$, рівні між собою) та фрактограма (b) поверхні руйнування у результаті поширення тріщини повзучості [2].

Fig. 8. Effect of pores and plastic deformation in the plastic zone at the crack tip on the stress distribution in it [6] (a: scheme of pores distribution; change of the density function $\rho(x)$ of dislocations splitting and change of tensile stresses in the plastic zone from $\sigma_{yy}^{(0)}(x)$ to $\sigma_{yy}(x)$, squares are limited to $\sigma_{yy}^{(0)}(x)$ and $\sigma_{yy}(x)$ which are equal to each other) and fractogram (b) of surface fracture during creep crack growth [2].

Отже, утворення пластичної зони біля вершини тріщини – це типовий релаксацийний процес, що протікає завдяки зменшенню нагромадженої енергії. Наведену схему поширення тріщини повзучості підтверджують також результати експериментальних досліджень [2, 5] (рис. 8b).

Таким чином, аналіз мікромеханізмів деформування і руйнування полікристалічних матеріалів свідчить, що макротріщини повзучості поширюються шляхом зародження, росту і об'єднання пор у пластичній зоні біля вершини тріщини. Це покладено в основу деформаційної моделі для визначення кінетики росту тріщини повзучості, яка сформульована нижче.

Деформаційна модель локального поширення тріщини повзучості. Застосуємо тепер схему (рис. 8a) утворення, росту і об'єднання пор у зоні передруйнування біля тріщини повзучості для побудови розрахункової моделі її поширення і визначення періоду докритичного росту. Для цього розглянемо полікрис-

талічне тіло (пластину) з плоскою початковою тріщиною розміром L_0 під дією довготривалого статичного навантаження, що викликає в ньому напружено-деформований стан, симетричний відносно площини розміщення тріщини. Вважаємо, що температура тіла і його механічні характеристики такі, що в зоні передруйнування біля контуру тріщини матеріал знаходиться в стані повзучості і тріщина буде поширюватися як тріщина повзучості. Задача полягає у визначенні часу $t=t^*$, за який тріщина повзучості L досягне критичного розміру $L = L^*$ і тіло зруйнується.

Розв'язок такої задачі будуватимемо, виходячи з механізму поширення тріщини повзучості шляхом зародження, росту і об'єднання пор. Для простоти побудови розрахункової моделі розглянемо цю задачу у двовимірному випадку (рис. 9). Тут L_{pl} – довжина пластичної зони біля вершини тріщини; ΔL – стрибок тріщини під час її поширення; $h(x)$ – розмір пор залежно від їх віддалі x від вершини тріщини; D – віддаль між порами, яку вважаємо сталою. Вихідна пористість матеріалу, тобто питома частка пор на площині тріщини в зоні передруйнування, становить S_0 , а вихідний розмір пор – h_0 .

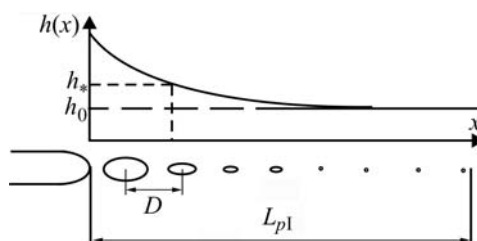


Рис. 9. Механізм просування тріщини повзучості шляхом утворення, росту і об'єднання пор.

Fig. 9. Mechanism of crack creep movement by formation, growth and coalescence of pores.

Розв'язуємо задачу за таких допущень. Вважаємо, що тріщина рухатиметься за механізмом об'єднання пор. Припускаємо також, що за одиницю часу навантаження контур тріщини просуватиметься на глибину зони ΔL , де досягнута критична пористість S_* , тобто пора з початкової величини h_0 досягне певного критичного розміру h_* , яка для цього матеріалу константа.

Відомо [8], що тріщина повзучості поширюється стрибками довжини ΔL за час підготовки стрибка Δt . Тоді швидкість V росту тріщини повзучості можна записати так:

$$V = dL / dt \approx \Delta L (\Delta t)^{-1}, \quad (1)$$

де величини ΔL , Δt визначаємо нижче.

Відоме [6] рівняння, що описує ріст пори діаметром h в умовах дії пластичної деформації ε_{pl}

$$dh / dt = h \cdot d\varepsilon_{pl} / dt. \quad (2)$$

Можемо приблизно припустити, що пластичну зону L_{pl} тріщина проходить зі сталою швидкістю. Нехай за одиницю часу навантаження тріщина просувається на ΔV . Тоді пора, що тільки ввійшла в пластичну зону, отримає приріст Δh , причому

$$\Delta h = h \cdot \Delta\varepsilon_{pl}. \quad (3)$$

Розглянемо $\Delta\varepsilon_{pl}$, як величину приросту пластичної деформації. Аналізуючи на основі [9] розподіл переміщень у пластичній зоні, подамо пластичну деформацію таким наближеним співвідношенням:

$$\varepsilon_{pl} = \delta_t \varepsilon_C \delta_{CC}^{-1} (1 - x L_{pl}^{-1})^n. \quad (4)$$

Тут δ_t – розкриття у вершині тріщини; δ_{CC} – його критичне значення за повзучості [10]; n – степінь, значення якого вибирається з міркувань наближення точного

розв'язку співвідношенням (4); ε_C – критичне значення деформації ε_{pl} . За час t навантаження, коли тріщина просунеться на $t\Delta V$, поточна пластична деформація для цієї пори у точці $x = L_p - t\Delta V$ становитиме

$$\varepsilon_{pl}(L_{pl} - t\Delta V) = \frac{\delta_t \varepsilon_C}{\delta_{CC}} \left(\frac{t\Delta V}{L_{pl}} \right)^n. \quad (5)$$

Отже, рівняння (2) набуде виду

$$\frac{dh}{dt} = h \cdot \frac{d}{dt} \left[\frac{\delta_t \varepsilon_C}{\delta_{CC}} \left(\frac{t\Delta V}{L_{pl}} \right)^n \right]. \quad (6)$$

Тепер, проінтегрувавши рівняння (6), отримаємо:

$$\int_{h_0}^{h_*} \frac{dh}{h} = \int_0^{t_*} d\varepsilon_{pl}, \quad (7)$$

де вважаємо, що t_* – час навантаження, за який пори, що ввійшла в пластичну зону, досягне розміру h_* і відбудеться стрибок тріщини на ΔL . Оскільки усереднюємо швидкість просування тріщини, тобто припускаємо, що за одиницю часу навантаження в межах даної пластичної зони тріщина проходитиме однакову віддаль ΔV , то можемо записати

$$t_* = \Delta L (\Delta V)^{-1}. \quad (8)$$

Підставивши це значення для t_* у рівняння (7) та проінтегрувавши його, отримуємо:

$$\varepsilon_C \left(\frac{\Delta L}{L_{pC}} \right)^n = \ln \frac{h_*}{h_0}. \quad (9)$$

Тут L_{pC} – критичне значення L_{pl} при $t = t_*$, яке на основі праці [9] визначаємо так:

$$L_{pC} = \delta_{CC} E \sigma_t^{-1}, \quad (10)$$

де E – модуль Юнга; σ_t – усереднені напруження в зоні передруйнування біля вершини тріщини.

Підставляючи (10) в рівняння (9), шукану величину ΔL визначимо так:

$$\Delta L = \delta_{CC} E \sigma_t^{-1} (\varepsilon_C^{-1} \ln(h_* h_0^{-1}))^{1/n}. \quad (11)$$

Співвідношення (11) можемо записати у вигляді

$$\Delta L = \alpha_1 \delta_{CC}, \quad (12)$$

де безрозмірна константа α_1 визначатиметься в такому вигляді

$$\alpha_1 = E \sigma_t^{-1} (\varepsilon_C^{-1} \ln(h_* h_0^{-1}))^{1/n}. \quad (13)$$

і в цілому знаходимо експериментально.

Перейдемо тепер до визначення величини Δt . Для цього застосуємо відомий [9] деформаційний критерій механіки руйнування, тобто за час $t = \Delta t$ в момент стрибка тріщини розкриття в її вершині дорівнюватиме критичному розкриттю δ_{CC}

$$\delta_t(\Delta t) = \delta_{CC}. \quad (14)$$

Розкриття вершини тріщини $\delta_t(t)$ за її повзучості подамо в найпростішій формі [8] для ділянки усталеної повзучості [1], вважаючи час на ній домінуючим

$$\delta_t(t) = \delta_0 + A_1 t. \quad (15)$$

Тут δ_0 – розкриття у вершині тріщини за початкового навантаження; A_1 – швидкість повзучості на ділянці усталеної повзучості [10]. Підставляючи (15) в (14), щоб визначити величину Δt , отримаємо формулу

$$\Delta t = A_1^{-1}(\delta_{CC} - \delta_0). \quad (16)$$

На основі співвідношень (1), (12) і (16) швидкість поширення тріщини повзучості визначатимемо рівнянням

$$V = \frac{dL}{dt} = \frac{\alpha_1 A_1}{1 - \delta_0 \delta_{CC}^{-1}}. \quad (17)$$

Аналогічно, як і у працях [1, 8], подамо швидкість A_1 на усталеній ділянці повзучості через початкове розкриття δ_0 тріщини в її вершині. При цьому врахуємо, що для низькотемпературної повзучості суттєвим є значення початкового розкриття $\delta_0 = \delta_{thc}$ за відсутності повзучості, тобто $A_1 = 0$. Враховуючи це, величину $\alpha_1 A_1$ подамо так:

$$\alpha_1 A_1 = A_{2t} \delta_{CC}^{-m} [\delta_0^m - \delta_{thc}^m]. \quad (18)$$

Тут $m, A_{2t}, \delta_{CC}, \delta_{thc}$ – характеристики кінетичної діаграми росту тріщини низькотемпературної повзучості, які визначають із експерименту [10]. Тоді, враховуючи співвідношення (18), рівняння (17) остаточно запишемо так:

$$V = \frac{dL}{dt} = \frac{A_{2t} \delta_{CC}^{-m} [\delta_0^m - \delta_{thc}^m]}{1 - \delta_0 \delta_{CC}^{-1}}. \quad (19)$$

Рівняння (19) збігається з аналогічним рівнянням, отриманим [10] за іншим підходом, побудованим на основі першого закону термодинаміки. Це підтверджує коректність і справедливість його застосування для дослідження кінетики росту тріщин низькотемпературної повзучості.

Для того, щоб визначити період $t = t_*$ докритичного росту тріщини повзучості до рівняння (19) треба додати початкові і кінцеві умови, тобто

$$t = 0, L(0) = L_0; \quad t = t_*, \quad L(t_*) = L_*; \quad \delta_0(L_*) = \delta_{CC}. \quad (20)$$

Якщо тріщина макроскопічна (виконується умова [9] $\delta_0 \delta_{CC}^{-1} = K_I^2 K_{CC}^{-2}$), то математичну модель (19), (20) для визначення періоду $t = t_*$ докритичного росту тріщини низькотемпературної повзучості запишемо у вигляді

$$V = \frac{dL}{dt} = \frac{A_{2t} K_{CC}^{-2m} [K_I^{2m} - K_{thc}^{2m}]}{1 - K_I^2 K_{CC}^{-2}}, \quad (21)$$

$$t = 0, L(0) = L_0; \quad t = t_*, \quad L(t_*) = L_*; \quad K_I(L_*) = K_{CC}, \quad (22)$$

де K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень [8, 10]; K_{thc}, K_{CC} – його нижнє і верхнє порогове значення на кінетичній діаграмі поширення тріщини низькотемпературної повзучості [10].

Таким чином, якщо на основі експериментальної методики [11] знайдені характеристики $m, A_{2t}, K_{thc}, K_{CC}$, то період докритичного росту тріщини низькотемпературної повзучості знаходимо на основі математичної моделі (21), (22).

Визначення залишкової довговічності смуги з тріщиною за її довготривалого розтягу. Для апробації моделі (21), (22) розглянемо результати [11] щодо поширення тріщин низькотемпературної повзучості в сталі 10ХСНД. На їх

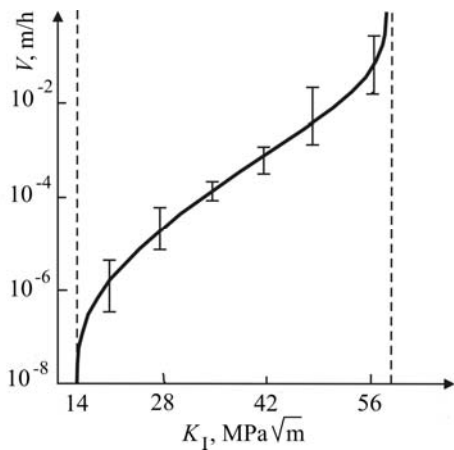


Рис. 10. Кінетична діаграма росту тріщини низькотемпературної повзучості в сталі 10XCHD [11].

Fig. 10. Kinetic diagram of low-temperature creep crack growth in 10XCHD steel [11].

смуги такою, що в зоні передруйнування біля контуру тріщини виникатиме низькотемпературна повзучість. Задача полягає у визначенні залишкової довговічності $t = t^*$ смуги (тобто періоду докритичного росту тріщин повзучості).

Розв'язок цієї задачі отримаємо на основі математичної моделі (21), (22). Згідно з працями [12, 13], коефіцієнт інтенсивності напружень тут знаходимо методом граничної інтерполяції

$$K_I = \frac{2,24p\sqrt{\pi}l}{\sqrt{(1-\lambda)(4+\lambda[1,25\pi^2-4])}}, \quad \lambda = \frac{l}{h}. \quad (24)$$

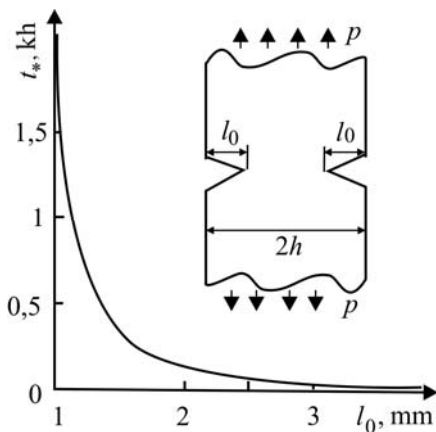


Рис. 11. Залежність часу t^* від зміни початкового розміру тріщини l_0 .

Fig. 11. Dependence of time, t^* , on the initial crack dimension, l_0 , change.

кову довговічність смуги з двома боковими тріщинами.

РЕЗЮМЕ. Проанализировано и синтезировано известные в литературе результаты исследований микромеханизмов роста трещин ползучести и на основании этого показано,

основі (рис. 10) побудована залежність $V-K_I$ для цієї сталі, де вертикальними відрізками наведено розкид експериментальних даних, а суцільна лінія відповідає залежностям (21), (22). Експериментально [11] отримано значення $K_{CC} = 58,3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$; $K_{thc} = 16,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, а з порівняння теоретичних і експериментальних результатів знайдено характеристики низькотемпературної повзучості:

$$A_{2t} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m/h}, \quad m = 4. \quad (23)$$

Розглянемо смугу з двома боковими тріщинами (рис. 11) під дією довготривалого статичного навантаження інтенсивності p , що викликало в ній напружено-деформований стан, симетричний відносно площини розміщення тріщини. Вважатимемо температуру

Разом з тим, розрахунок проводитимемо для смуги зі сталі 10XCHD з такими механічними (23) і геометричними параметрами: $h = 10 \text{ mm}$, $p = 280 \text{ MPa}$. З розв'язку математичної задачі (21), (22), враховуючи (23) і (24), побудуємо залежність t^* від зміни початкового розміру тріщини l_0 . Як бачимо (рис. 11), довговічність смуги суттєво залежить від розміру початкового дефекту.

ВИСНОВКИ

На основі аналізу і синтезу відомих у літературі результатів досліджень микромеханізмів поширення тріщин повзучості побудовано математичну модель для оцінки довговічності елементів конструкцій з такими тріщинами. За допомогою запропонованого кінетичного рівняння моделі можна розрахувати залишкову довговічність смуги з двома боковими тріщинами.

что трещины ползучести, в основном, растут путем зарождения, увеличения и объединения пор. Это положено в основание формулировки расчетной модели для определения периода докритического роста трещин низкотемпературной ползучести в конструкционных материалах. В результате чего получено кинетическое уравнение роста этих трещин как зависимость скорости от коэффициента интенсивности напряжений. Это уравнение вместе с первоначальными и конечными условиями составляют расчетную модель для определения периода докритического роста трещин низкотемпературной ползучести.

SUMMARY. The analysis and synthesis of the research results known in literature on the micromechanisms of creep crack growth were carried out. A conclusion was done, that the creep cracks mainly grew by initiation, propagation and coalescence of pores. This forms the bases for the formulation of the calculation model for determination the period of subcritical low-temperature creep crack growth in construction materials. As a result the kinetic equation of low temperature creep crack growth as dependence of its growth speed on the stress intensity factor was obtained. This equation together with the initial and final conditions form the calculation model for determination of the subcritical period of low-temperature creep crack growth.

1. *Гарофало Ф.* Законы ползучести и длительной прочности металлов. – М.: Metallurgy, 1968. – 304 с.
2. *Бичем К. Д.* Микропроцессы разрушения // Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения / Пер. с англ. под ред. А. Ю. Ишлинского. – М.: Мир, 1973. – Т. 1. – С. 265–375.
3. *Murakami Yu.* Effect of hydrogen on fatigue crack growth in metals // Proc. 17th Eur. Conf. on Fracture, ECF-17: “Multilevel Approach to Fracture of Materials, Components and Structures”, Brno, Czech Republic, 2008. – ESIS Czech Chapter, 2008. – CD ROM. – ISBN: 978-80-214-3692-3 – CE170081. – P. 25–42.
4. *The specific of the creep process in hydrogen of the degraded in service 2.25Cr–Mo steel / A. Zagórski, O. Student, L. Babiy et al.* // Proc. 17th Eur. Conf. on Fracture, ECF-17: “Multilevel Approach to Fracture of Materials, Components and Structures”, Brno, Czech Republic, 2008. – ESIS Czech Chapter, 2008. – CD ROM. – ISBN: 978-80-214-3692-3 – CE170082. – P. 2300–2307.
5. *Hayhurst D. R., Lin J., and Hayhurst R. J.* Failure in notched tension bars due to high-temperature creep: Interaction between nucleation controlled cavity growth and continuum cavity growth // Int. J. of Solids and Structures. – 2008. – 45. – P. 2233–2250.
6. *Владимиров В. И.* Физическая природа разрушения металлов. – М.: Metallurgy, 1984. – 280 с.
7. *Тайра С., Отани Р.* Теория высокотемпературной прочности материалов. – М.: Metallurgy, 1986. – 280 с.
8. *Андрейків О. Є., Сас Н. Б.* Механіка руйнування металічних пластин при високотемпературній повзучості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – 42, № 2. – С. 62–68.
(*Andreikiv O. E. and Sas N. B.* Fracture mechanics of metallic plates under the conditions of high-temperature creep // Materials Science. – 2012. – 42, № 2. – P. 210–219.)
9. *Андрейків А. Е.* Пространственные задачи теории трещин. – К.: Наук. думка, 1982. – 348 с.
10. *Довговічність пластин з тріщинами за довготривалого статичного навантаження / О. Є. Андрейків, В. Р. Скальський, Ю. Я. Матвіїв, Т. А. Крадінова* // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – 48, № 1. – С. 39–46.
(*Andreikiv O. E., Skal'skyi V. R., Matviiv Yu. Ya., and Kradinova T. A.* Evaluation of the durability of cracked plates under the conditions of long-term static loading and local creep // Materials Science. – 2012. – 48, № 1. – P. 36–45.)
11. *Скальський В. Р., Матвіїв Ю. Я., Крадінова Т. А.* Методика оцінки характеристик повзучості матеріалів // Машинознавство. – 2012. – № 1. – С. 27–32.
12. *Саврук М. П.* Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. – К.: Наук. думка, 1988. – 620 с.
13. *Андрейків О. Є., Долінська І. Я., Яворська Н. В.* Оцінка періодів зародження і поширення повзучо-втомних тріщин в тонкостінних елементах конструкцій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, № 3. – С. 7–15.
(*Andreikiv O. E., Dolins'ka 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.)

Одержано 06.11.2012