

А.І. Кондир, В.М. Палаш, П.В. Гладиш
 Національний університет “Львівська політехніка”,
 кафедра фізики металів та матеріалознавства,
 кафедра зварювального виробництва, діагностики
 та відновлення металоконструкцій

НАКОПИЧЕННЯ МІКРОПОШКОДЖЕНЬ ПІД ЧАС ПОВЗУЧОСТІ ТА ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ВІДНОСНОГО РЕСУРСУ СТАЛІ 12МХ

© Кондир А.І., Палаш В.М., Гладиш П.В., 2006

Наведено результати випробувань на повзучість та визначення ступеня пошкодження порами з метою оцінки залишкового ресурсу сталі 12МХ. Показано, що в умовах одновісного напруженого стану корисна відносна довговічність сягає 0,80–0,82 від часу до руйнування. Виявлено лінійну залежність між відносною об'ємною часткою пор та відносною дійсною деформацією повзучості. З метою оцінки ступеня деградації матеріалу на третій стадії повзучості обговорено термін накопичення пошкоджень.

A detailed analysis of creep strain results and microdeterioration by pores during testing for low alloyed 12MKh steel with the aim of an estimation of a residual lifetime prediction has been undertaken. It is shown that for uniaxial stress state the useful relative lifetime achieves up to 0,80–0,82 from time to rupture. The results reveal that relative volume fraction of pores is a linear function of relative true strains. In order to account for deterioration of a material during creep, and explain the shape of tertiary creep, the concept of creep damage accumulation is discussed.

Серед актуальних проблем сучасної теплоенергетики особливе місце посідає розроблення методів оцінки працездатності елементів конструкцій та підвищення надійності експлуатації устаткування. Під час роботи обладнання, елементи якого перебувають під напруженням упродовж тривалого часу, виникає задача встановлення відносної (або залишкової корисної) довговічності елементів конструкції за заданих параметрів. Коректна оцінка ступеня пошкодження елементів конструкцій ускладнюється тим, що за умов експлуатації більшість їх перебуває під дією змінних у часі напружень та температур, які виникають внаслідок вмикань і вимикань обладнання та зміни значень його робочих параметрів. Впливає складнонапружений стан елементів конструкції. Коректному визначенню параметрів довговічності заважає також деградація структури матеріалів унаслідок тривалого накопичення пошкоджень.

В інженерних розрахунках, для випадків роботи устаткування в умовах змінних температури і напружень, за основу визначення ресурсу взято закон підсумовування відносних довговічностей [1]. За цим законом кожна частка використаної довговічності є незалежною від інших. Вважають, що руйнування відбувається у той момент, коли сума частин довговічностей дорівнює одиниці:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{\tau_{pi}} = 1, \quad (1)$$

де τ_i – час роботи за відомих температури та напруження; τ_{pi} – розрахунковий час до руйнування за таких самих температури та напруження; n – число змін напруження та температури.

У зв'язку з тим, що закон підсумовування відносних довговічностей у загальному випадку не забезпечує числової кореляції, було запропоновано декілька інших методів підсумовування відносної деградації структури [2–5]. Проте застосовувані методи оцінки залишкового ресурсу не пов'язують залежність довговічності від інтенсивності накопичення мікропошкоджень. Водночас для забезпечення надійної роботи устаткування потрібні методи виявлення критичного ступеня пошкодження конструкційного матеріалу, перевищення якого робить його експлуатацію ненадійною.

Вирізняють два основні недоліки більшості досліджень [1, 4]. Перший недолік пов'язаний з тим, що до пошкодження під час повзучості ставляться швидше як до теоретичного поняття, аніж як до окремого фізичного явища, параметри якого можна виміряти. Другим недоліком є те, що експерименти планують з метою перевірки котрогось конкретного закону підсумовування. У результаті можна оцінити, чи є закон підсумовування придатним, але не можна встановити причину його непридатності та дійсні закономірності зміни відносної (або залишкової) довговічності.

Метою цієї роботи є дослідження впливу деформаційних пошкоджень під час повзучості в умовах одновісного напруженого стану на відносну тривалість випробувань сталі 12МХ рядових плавок після нормалізації від 920 °С та відпуску за 680 °С.

Випробування на повзучість проводили за 500...600 °С та початкових напружень від 49,0 до 281,5 МПа на плоских зразках з розмірами 10×15×100 мм згідно з вимогами стандартів. Під час проведення експериментів вимірювали відносне видовження зразка аж до руйнування. Первинні криві повзучості модифікували для одержання залежності “дійсна деформація ϵ – відносна тривалість випробувань τ/τ_p ”.

Випробування на повзучість періодично переривали і за збільшень від 500 до 1000 разів засобами стереометричної металографії [6] вимірювали накопичену за час експерименту об'ємну частку пор f , яку, як і накопичення деформації повзучості, обрали за міру пошкодження структури сталі. Мікроструктурні дослідження проводили на ділянках зразків площею 80–100 мм², які полірували та хімічно контрастували за методикою, поданою в роботі [7].

На рис. 1 для різних температур та напружень показано границі зміни дійсної деформації та об'ємної частки пор під час повзучості сталі, визначені регресійним аналізом. Форма кривих накопичення деформації повзучості та ступеня пошкодження порами залежно від відносної довговічності є майже однаковою. За $\tau/\tau_p = 1$ досліджувані параметри набувають значень дійсного видовження зразка під час розриву ϵ_p та об'ємної частки пор поблизу місця руйнування f_p .

Результати аналізу кривих розподілу дійсної деформації та об'ємної частки пор залежно від часу випробувань свідчить, що відносні параметри деградації структури, розраховані у деформаційному вигляді ϵ/ϵ_p та за ступенем мікропошкодження порами f/f_p , також змінюються дуже подібно (рис. 2). Тут подано результати розрахунку для крайніх границь діапазону зміни параметрів.

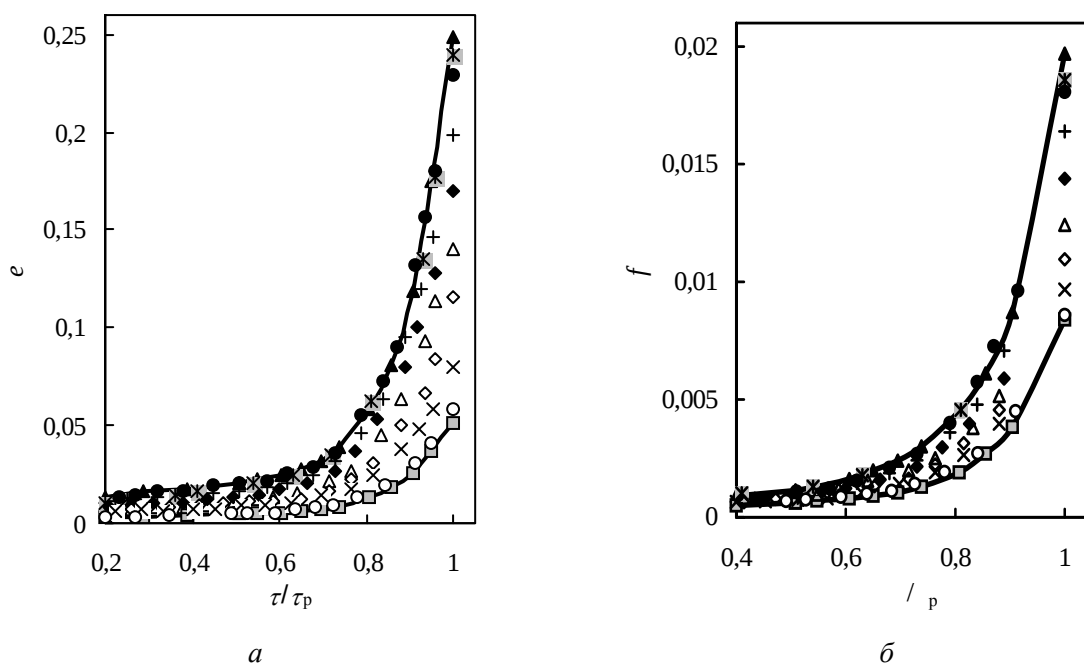


Рис. 1. Зміна дійсної деформації (а) та об'ємної частки пор (б) під час повзучості сталі 12МХ

Порівняння кривих накопичення з часом деформації та ступеня пошкодження порами сталі 12МХ засвідчує, що обидва процеси починають істотно впливати на третю стадію повзучості після наробітку відповідно 0,2 та 0,4 від τ/τ_p . Тому зіставленням кривих деформування та накопичення мікропошкоджень залежно від часу експлуатації (або випробувань) та результатів металографічного аналізу можна встановити гранично допустиму частку мікропор на третій стадії повзучості, за перевищення якої експлуатація елементів конструкцій парогенеративного устаткування стає ненадійною. За такого підходу можливими є також одержання інших кореляційних залежностей, наприклад, встановлення поточного ресурсу до наступного планового контролю.

На графіках (рис. 2, а, б) вирізняються три характерні стадії накопичення з часом пошкоджень структури внаслідок пластичного деформування та пороутворення: повільного ($\tau/\tau_p < 0,65$), поступово зростаючого ($0,65 < \tau/\tau_p < 0,85$) та швидкого ($\tau/\tau_p > 0,85$). Точку перетину прямолінійних ділянок, що відповідають першій та третій стадіям процесу деградації структури, визначали засобами регресійного аналізу, беручи за умову одержання найменшої середньоквадратичної похибки. За обома способами визначення вона відповідає відносній тривалості випробувань $0,82 \tau/\tau_p$. Отже, можна вважати, що інтенсивне зростання ступеня пошкодження сталі 12МХ під час випробувань в умовах одновісного напруженого стану настає, коли тривалість випробування досягає 0,80–0,82 від виміряного (або розрахункового) часу до руйнування.

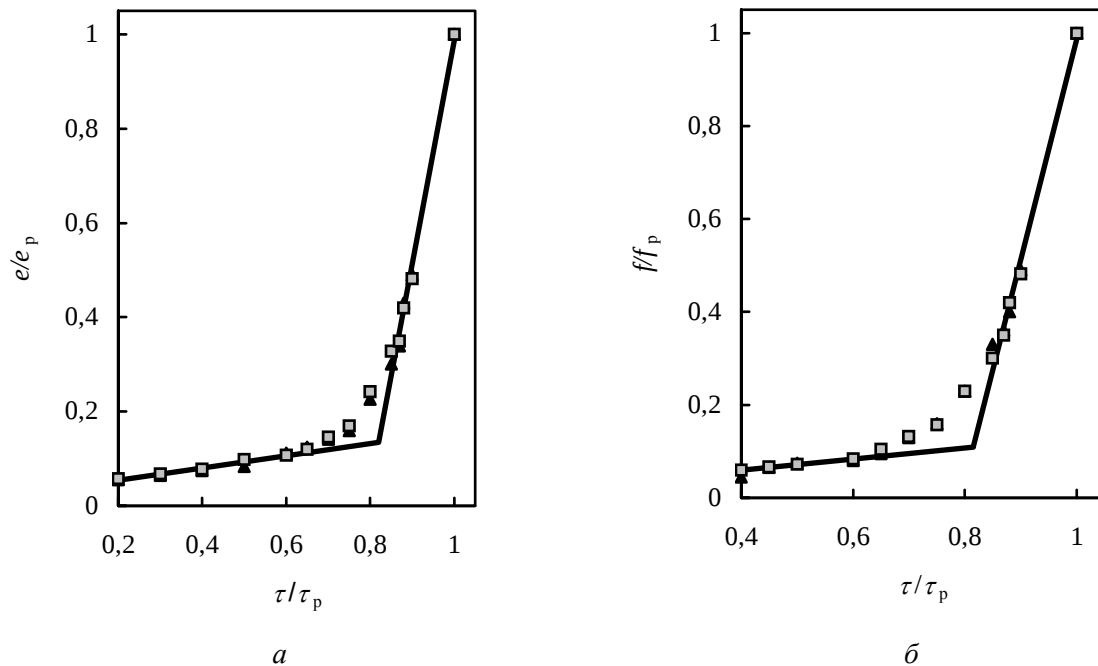


Рис. 2. Зміна відносних параметрів пошкодження структури під час повзучості за ступенем:
а – дійсної деформації; б – мікропошкодження порами

Співвідношення відносних параметрів деградації структури, визначених за ступенями мікропошкодження порами f/f_p та деформації e/e_p , вказує на лінійну залежність між ними (рис. 3). Для сталі 12МХ коефіцієнт пропорційності дуже близький до одиниці; він становить 0,9945 за достовірності апроксимації $R^2 = 0,99$ (R – коефіцієнт парної кореляції).

Отримані результати щодо безпосереднього зв'язку пластичного деформування з процесами зародження та утворення пор не випадкові: під час повзучості пластичне деформування сприяє зародженню мікропор, наприклад, унаслідок утворення порогів на рухомих дислокаціях та зародження вакансій під час руху дислокацій з порогами. Тому поява надлишкових відносно термічних вакансій, викликаних пластичним деформуванням, визначає швидкість росту мікропор.

Наявність системи пор також прискорює повзучість внаслідок релаксації напружень, стоку вакансій до границь зерен тощо. Звідси випливає важливий практичний висновок про можливість оцінки ступеня розвитку одного процесу за характеристиками іншого. Зокрема, ступінь пошкодження елемента конструкції можна оцінювати за результатами експлуатаційних досліджень характеристик повзучості, а саме – вимірюванням ступеня його пластичної деформації. Проте за таких підходів потрібно створювати базу даних щодо характеристик повзучості матеріалів та ступеня їх пошкодження на різних етапах процесу.

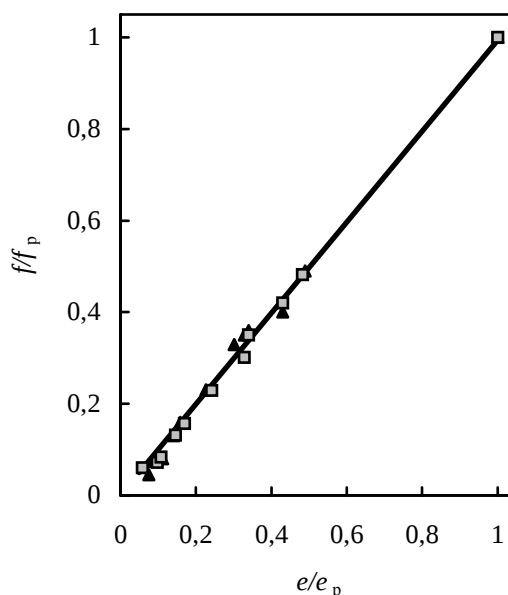


Рис. 3. Відносні параметри деградації структури під час повзучості сталі 12МХ

Внаслідок того, що повзучість є результатом перебігу різних фізичних явищ, які пов'язані між собою, неможливо описати процес у межах якоїсь однієї моделі. Для розв'язання такої задачі використовують рівняння феноменологічного типу, у яких з найбільшою точністю враховано сумарний ефект впливу головних фізичних процесів деградації під час повзучості. Виявлена залежність між відносними ступенями пластичної деформації та мікропошкодження порами створює передумови для раціонального вибору методів підсумовування відносних працездатностей. На нашу думку, доки концепцію оцінки ступеня пошкодження жароміцних (теплостійких) матеріалів остаточно не визнано, потребують подальшого вивчення такі методи встановлення залишкового ресурсу, що поєднують і відносний показник довговічності, і структурний фактор деградації, подібний до запропонованого у [5]:

$$K \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{\tau_{pi}} + (1 - K) \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{e_{pi}} = 1, \quad (2)$$

де K – стала ($K \leq 1$).

Перевагою такого підходу до розв'язання задачі оцінки залишкового ресурсу є те, що фактично враховується ступінь мікропошкодження матеріалу порами. Проте постає задача вибору правильного співвідношення значення відносної довговічності та деформаційного (з певною часткою за рахунок утворення пор) пошкодження, яке характеризує коефіцієнт K у рівнянні (2).

Висновки. Деградація структури на третій стадії повзучості сталі 12МХ унаслідок накопичення деформації та пошкодження порами починається після наробітку відповідно 0,2 та 0,4 від τ/τ_p . Інтенсивне зростання ступеня пошкодження сталі 12МХ під час випробувань в умовах

одновісного напруженого стану настає, коли тривалість випробувань на повзучість досягає 0,80–0,82 від часу до руйнування. Між відносними параметрами деградації структури сталі 12МХ, визначеними за ступенями деформації та мікропошкодження порами, виявлена лінійна залежність.

1. Odquist F.K.G. *Mathematical Theory of Creep and Creep Rupture*. 2-nd editoin. Oxford at the Clarendon press. – 1974. – 540 p. 2. Работнов Ю.Н. *Ползучесть элементов конструкций*. – М.: Наука, 1966. – 752 с. 3. Качанов Л.М. *Основы механики разрушения*. – М.: Наука, 1974. – 311 с. 4. Freeman J.W., Voorhees H.R. *Literature Survey on Creep Damage in Metals*. ASTM STP 391. – 1965. – 120 p. 5. Abo El Ata M.M., Finni I. *On the Prediction of Creep-Rupture Life of Components under Multiaxial Stress* // *Proc. International Conf. on Creep in Structures*. – New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1972. – P. 80–89. 6. Салтыков С.А. *Стереометрическая металлография*. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с. 7. Пастернак В.П., Гладиш П.В. *Прогнозування ресурсу згинів високотемпературних паропроводів за результатами дослідження їх мікропошкодження* // *Налагоджувальні, експериментальні та науково-дослідні роботи ВАТ “ЛьвівОРГРЕС”*. – Львів, 2004. – С. 253–257.

УДК 539.377

Р.В. Лампіка, Б.С. Воробець*

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронного машинобудування,

* кафедра опору матеріалів

ВПЛИВ НАПОВНЮВАЧА НА СТІЙКІСТЬ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ ПРИ КОНТАКТНОМУ ЗВАРЮВАННІ

© Лампіка Р.В., Воробець Б.С., 2006

Досліджується температурне поле, напружено-деформований стан та стійкість термопружної рівноваги циліндричних оболонок з наповнювачем, стиснутих в осьовому напрямі, при з’єднанні їх встик за допомогою контактного зварювання.

The warm-up field, tense-deformed condition and a thermo-tense balance stability of cylindrical shell with stuff which is compressed in the axial direction and warmed by the sources of heat concentrated on recirculating line are researched.

У багатьох випадках надійність тонкостінних елементів конструкцій і деталей машин визначається не тільки їх міцністю, але й стійкістю. Особливе місце серед них займає циліндрична оболонка, яка є елементом конструкцій двигунів, літаків, ракет, резервуарів тощо.

Стійкість циліндричної оболонки у разі силових навантажень достатньо повно вивчено [1–4]. Дослідженню стійкості термопружної рівноваги тонких оболонок за заданого найпростішого розподілу температури присвячено працю [4]. Крім того, у [2, 5, 6] показано, що під час дії на оболонку локальних (силових чи температурних) навантажень необхідно для визначення критичних параметрів враховувати моментність докритичного стану.

Значно менше вивчено стійкість циліндричних оболонок, що знаходяться у довільному температурному полі. У цьому випадку необхідно у взаємозв’язку дослідити процеси теплопровідності, докритичного стану та стійкості термопружної рівноваги оболонок у разі їх конвективного теплообміну з навколишнім середовищем і дії зовнішнього навантаження. Під час локального нагрівання оболонки поряд з врахуванням моментності докритичного напруженого стану необхідно врахувати ще й докритичне викривлення твірної оболонки [2, 6]. Як засвідчують