УДК 620.192.7

Моделювання процесу пошкодження матеріалу при повзучості з накладанням додаткової високочастотної циклічної складової

П. В. Ясній, М. П. Галущак, С. І. Федак

Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, Тернопіль, Україна

Розроблено модель динамічної повзучості, яка враховує зміну пошкодження матеріалу і дозволяє прогнозувати залежність деформації динамічної повзучості від параметрів навантаження.

Ключові слова: динамічна повзучість, зернистість матеріалу, пошкодження матеріалу, пори.

Упродовж експлуатації найбільш відповідальні високонавантажені елементи конструкцій (турбіни, трубопроводи, посудини високого тиску, мостові конструкції, авіатехніка) нарівні з довготривалими статичними напруженнями можуть зизнавати дії низькоамплітудних циклічних, що істотно впливає на довготривалу міцність матеріалів. Дослідження, що проводяться в цьому напрямку, стосуються переважно зміни параметрів мікроструктури матеріалу та їх залежності від зовнішнього навантаження [1]. Відомо дуже мало наукових праць щодо розробки моделей повзучості з урахуванням цих змін. Класичні моделі в достатній мірі описують процес повзучості за стаціонарного навантаження ($\sigma = \text{const}$) при незмінній мікроструктурі матеріалу. Поява нових фізико-механічних моделей повзучості, що враховують зміну поперечного перерізу, дає основу для створення моделі з урахуванням зміни зернистості та пористості матеріалу [2].

Метою цього дослідження є створення моделі повзучості за сумісної дії статичного і високочастотного циклічного навантаження з урахуванням параметра пошкоджуваності, який пов'язаний зі зміною зернистості і пористості матеріалу.

Проведені раніше авторами дослідження показали, що накладання додаткових низькоамплітудних циклічних навантажень призводить до значного збільшення деформації повзучості сплаву АМг6 порівняно з чисто статичним навантаженням при однаковій максимальній напрузі [3]. Установлено, що основним механізмом збільшення деформації повзучості сплаву АМг6 при накладанні циклічної складової є процес зародження і розвитку мікропор внаслідок подрібнення зерен, що призводить до зростання їх кількості і кількості центрів зародження пор [4]. У зв'язку з цим логічно пов'язувати зміну кількості центрів зародження пор у матеріалі зі зміною його зернистості.

Опис моделі.

1. За параметр пошкодження вибрано площу пор у поперечному перерізі зразка. Для аналізу напружено-деформованого стану в структурному елементі використано теорію зміцнення і концепцію істинних напружень [5] у вигляді

© П. В. ЯСНІЙ, М. П. ГАЛУЩАК, С. І. ФЕДАК, 2003

$$\dot{p}_i = B(\sigma_i)^k p_i^m; \tag{1}$$

$$\sigma_i = \frac{\sigma_i^{br}}{1-S}, \tag{2}$$

де p_i – деформація повзучості; $\dot{p}_i$ – швидкість деформації повзучості; σ_i – інтенсивність напружень; B, k, m – сталі матеріалу; σ_i^{br} – інтенсивність нормальних напружень в брутто-перерізі зразка; S – відносна площа пор.

2. Припускається, що процес росту пори контролюється величиною непружної деформації. Тому для опису росту ізольованої пори в умовах пластичного деформування використовується рівняння Райса–Трейсі [6]:

$$\frac{dr}{\overline{dp_i}} = 0{,}28\, r \exp\left(1{,}5\frac{\sigma_m}{\sigma_i}\right), \tag{3}$$

де r – радіус пори; σ_m – гідростатична компонента тензора напружень; $\overline{dp_i}$ – інтенсивність приростів деформації повзучості.

Розв'язком рівняння (3) буде вираз

$$r(p_1, p, r_0) = r_0 \exp\left[\int_{p_1}^{p} 0{,}28 \exp\left(1{,}5\frac{\sigma_m}{\sigma_i}\right)\overline{dp_i}\right], \tag{4}$$

де r_0 – радіус пори в момент її ініціації при деформації p_1; p – поточне значення деформації повзучості для пори радіуса r.

Допускається, що пора має вплив на процес повзучості за умови досягнення її радіусом деякого початкового значення r_0.

3. У випадку знаходження розв'язку рівняння (3) у вигляді $r(p_1, p, r_0)$ загальна площа пор, що утворилися при деформації повзучості від p_0 до p, буде

$$S = S_1 + S_2. \tag{5}$$

Тут

$$S_1 = N_0 \pi \int_{p_0}^{p} r^2(p_1, p, r_1)\, dp_1; \qquad S_2 = \beta(d_m)\pi \int_{p_0}^{p} r^2(p_1, p, r_0)\, dp_1,$$

де S_1 – площа пор, що утворилися в матеріалі до початку деформації p_0 і продовжують рости зі збільшенням деформації повзучості p; S_2 – площа пор, що утворилися упродовж повзучості від деформації p_0 до p; N_0 – кількість пор у матеріалі до початкового рівня деформації повзучості p_0; r_1 – середнє значення радіуса пор, що утворилися в матеріалі на етапі квазістатичного розтягу до початкового рівня деформації повзучості p_0; $\beta(d_m)$ – функція, що залежить від розміру зерна.

4. Для опису процесу зародження пор використано аналітичну залежність між пластичною деформацією та пороутворенням [7]. Кількість пор N, що утворилися, визначається за формулою

$$\dot{N} = \beta_0 \bar{\dot{\varepsilon}}_i \quad \text{або} \quad N = \beta_0 (\varepsilon_i - \varepsilon_0) + N_0, \tag{6}$$

де ε_i – пластична деформація; ε_0 – пластична деформація, що відповідає початку зародження пор; β_0 – незалежна від напружень стала; $\bar{\dot{\varepsilon}}_i = \dfrac{d\bar{\varepsilon}_i}{dt}$ – інтенсивність швидкостей деформації; $\dot{N} = \dfrac{dN}{dt}$ – швидкість пороутворення; t – час.

Відомо, що одним з основних механізмів пошкодження матеріалу є зародження, ріст і об'єднання пор. Транскристалітному типу руйнування передує процес пошкодження, що супроводжується внутрішньозеренним зміцненням. Найбільшими концентраторами дислокацій в тілі зерна є включення, що служать бар'єрами на шляху дислокаційного потоку. За умови низької щільності дислокацій можливий механізм "огинання" включень за рахунок поперечного ковзання, однак при циклічному навантаженні відбувається зміна розмірів зерна та його елементів (субзерен). Оскільки розмір зерна пов'язаний з щільністю дислокацій [8], то його зменшення внаслідок додаткової циклічної складової є пропорційним до збільшення щільності дислокацій і відповідно до утворення пор на включеннях, що за статичного навантаження огиналися і деформувалися разом із матрицею. Розмір включень впливає на виникнення пор – для зародження пор біля менших включень необхідна більша щільність дислокацій в околі включення, що забезпечує циклічна складова [9].

Для опису процесу повзучості матеріалу з накладанням циклічної складової введемо додатковий параметр, який враховує зміну зернистості матеріалу у вигляді функції $\beta(d_m)$ наступним чином:

$$\dot{N} = \beta\left(\frac{d_m}{d_0}\right)\bar{\dot{\varepsilon}}_i, \qquad \beta\left(\frac{d_m}{d_0}\right) = \beta_0\left(\frac{d_m}{d_0}\right)^{\theta}, \tag{7}$$

де θ – стала матеріалу; d_0 – середній діаметр зерна у поперечному перерізі зразка при $p = p_0$.

Перевірка моделі. Запропонований підхід був використаний для опису експериментальних результатів повзучості сплаву АМг6 за різних рівнів напружень в інтервалі σ_m = 300…355 МПа.

Процеси повзучості матеріалу досліджували при статичному і комбінованому навантаженні. При статичних випробуваннях зразки навантажували зі швидкістю $\dot{\sigma}$ = 1,6 МПа/с до заданого рівня напружень σ_c. При комбі-

нованому навантаженні до зразка прикладали зусилля, що зростало в часі з тією ж швидкістю до величини $\sigma_{ср}$ ($\sigma_{ср}$ – середнє напруження циклу), після чого накладали циклічне навантаження з амплітудою $\sigma_a = \pm 25$ МПа і частотою $f = 25$ Гц. Експерименти проводили при температурі 293 К загальною тривалістю до 300 хв.

Об'єктом експериментів служили виготовлені з алюмінієво-магнієвого сплаву АМг6 циліндричні зразки діаметром 10 мм. Основні механічні характеристики матеріалу в стані поставки: $\sigma_{0,2} = 175$ МПа; $\sigma_в = 360$ МПа; $\delta = 18{,}2\%$; $\psi = 34\%$.

Експериментальні дослідження статичної повзучості при напруженнях $\sigma_c = 300$, 340 і 355 МПа і динамічної повзучості при комбінованому навантаженні за тих же напружень та умови $\sigma_{max} = \sigma_c$ показали, що в усіх випадках накладання циклічної складової призводить до збільшення повзучості (на рисунку точки *1*, *2*). Детальний аналіз цих результатів виконано у роботі [3].

Дослідження мікроструктури сплаву АМг6 дозволили виявити механізм впливу додаткових циклічних напружень на збільшення деформації при динамічній повзучості. У всіх досліджених на повзучість зразках у поздовжньому перерізі спостерігається подрібнення видовжених зерен, зменшення їх довжини в 0,3...0,5 рази порівняно з початковим станом. Ступінь подрібнення збільшується при зростанні рівня напружень σ і накладанні циклічних навантажень [4]. Досліджували також залежність між максимальним розміром зерна d_m у поперечному перерізі в процесі динамічної повзучості та максимальним розтягуючим напруженням σ_{max}. Отримані результати дозволяють прогнозувати, що в досліджуваному інтервалі напружень σ_{max} зміна d_m буде лінійною. Ця залежність дає змогу при розрахунках в інтервалі $\sigma_{max} = 300...355$ МПа спростити функцію (6) до наступного вигляду:

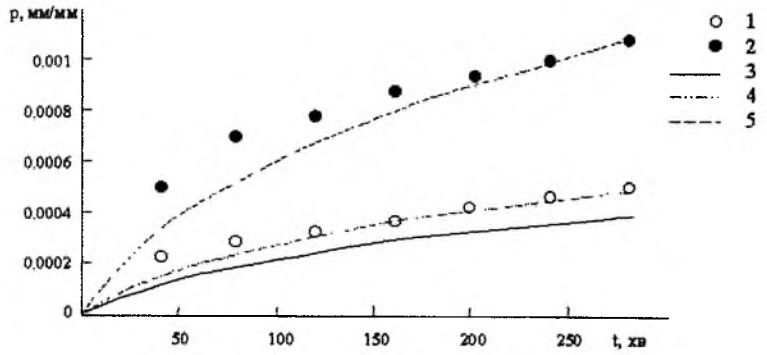
$$\dot{N} = \beta(\sigma_{max}, d_0)\dot{\bar{\varepsilon}}_i. \qquad (8)$$

Параметри моделі B, k, m визначалися за результатами двох експериментів на повзучість в умовах стаціонарного навантаження при різних рівнях розтягуючого напруження та двох експериментів на динамічну повзучість при максимальних напруженнях, рівних напруженню стаціонарної повзучості [3].

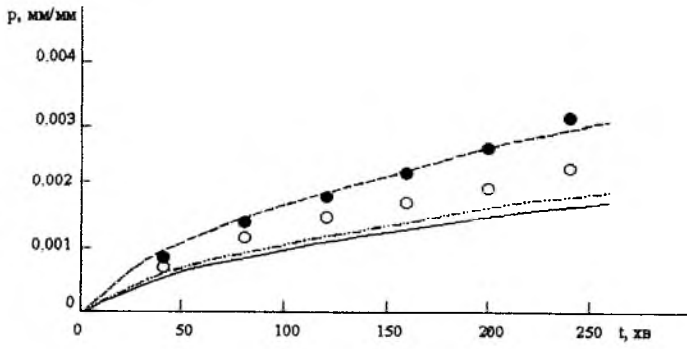
Металографічні дослідження проводилися для первинної (недеформованої) структури матеріалу та для зразків після зазначених вище експериментів.

За результатами дослідження зразків після повзучості визначено сталі матеріалу β_0 (статичне навантаження) і θ (комбіноване навантаження) та встановлено залежність між максимальним розміром зерна d_m у поперечному перерізі в процесі динамічної повзучості і функцією $\beta(\sigma_{max}, d_0)$.

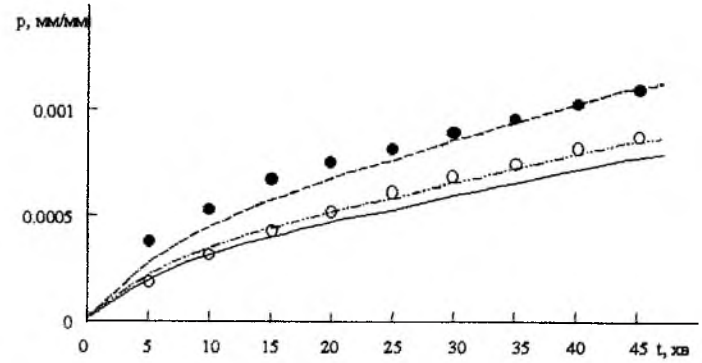
За даними обстеження первинної структури визначено сталу величину матеріалу d_0 (початковий розмір зерна) і початкову кількість пор у матеріалі [4]. Знання кількості пор у первинному матеріалі і параметр β_0 дали можливість визначити для кожного рівня напруження параметр N_0.



а



б



в

Експериментальна (точки) і розрахункова (лінії) діаграми повзучості сплаву АМг6 при статичному (*1*, *3*, *4*) і комбінованому (*2*, *5*) навантаженні при $\sigma_{\max} = 300$ (*а*), 340 (*б*) і 355 МПа (*в*): *3*, *4*, *5* – розрахунок за формулами відповідно (1), (1)–(6) і (1)–(5), (7).

Площа пор на момент початку процесу повзучості визначається за даними металографічного аналізу зразків після експеримента на квазістатичний розтяг. Узагальнення цих результатів описано в роботі [10]. На їх основі з урахуванням параметра N_0 визначено середній радіус пор r_1, що утворилися в матеріалі до початкового рівня деформації повзучості.

Значення параметрів пошкодження, що використовувалися для розрахунку кривих динамічної повзучості сплаву АМг6 при різних σ_{max}

Параметри	σ_{max}, МПа		
	300	340	355
d_m, м	$5{,}5 \cdot 10^{-5}$	$5{,}9 \cdot 10^{-5}$	$7{,}0 \cdot 10^{-5}$
r_1, м	$1{,}260 \cdot 10^{-6}$	$1{,}144 \cdot 10^{-6}$	$1{,}065 \cdot 10^{-6}$
N_0, м$^{-2}$	$1{,}123 \cdot 10^{9}$	$1{,}405 \cdot 10^{9}$	$1{,}663 \cdot 10^{9}$

Розраховували динамічну повзучість сплаву АМг6 при 293 К з використанням наступних параметрів: $p_0 = 6 \cdot 10^9$ м$^{-2}$; $d_0 = 8 \cdot 10^{-5}$ м; $\theta = -7{,}5$; $r_0 = 5 \cdot 10^{-7}$ м; $B = 1{,}14 \cdot 10^{-49}$; $m = 0{,}6$; $k = 16{,}5$. Додаткові параметри, що використовувалися в разрахунках при різних рівнях напружень σ_{max}, наведено в таблиці.

Отримані згідно із запропонованим підходом і обчислені за формулами (1)–(5), (7) розрахункові криві задовільно узгоджуються з експериментом (на рисунку крива *5*).

Таким чином, описана модель дає можливість прогнозувати процес динамічної повзучості матеріалу за умови накладання додаткової циклічної складової з постійними зовнішніми параметрами навантаження – частотою, максимальним напруженням циклу та амплітудою.

Робота виконувалася за рахунок бюджетних коштів Державного фонду фундаментальних досліджень України.

Резюме

Разработана модель динамической ползучести, которая учитывает смену поврежденности материала и позволяет прогнозировать зависимость деформации динамической ползучести от параметров нагружения.

1. *Lukas P., Kunz L., and Sklenicka V.* Interaction of high cycle fatigue with high temperature creep in two creep-resistant steels // Mater. Sci. Eng. – 1990. – No. 129. – P. 249 – 255.
2. *Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А.* Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – СПб: Политехника, 1993. – 391 с.
3. *Ясній П. В., Галущак М. П., Федак С. І., Подкользін В. Ю.* Циклічна повзучість сплаву АМг6 // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2000. – № 1. – С. 43 – 46.
4. *Ясній П. В., Галущак М. П., Стоянова О. М., Федак С. І.* Мікроструктурні особливості деформування сплаву АМг6 при повзучості та розтягуванні // Там же. – 2001. – № 5. – С. 64 – 68.
5. *Куклина О. В., Марголин Б. З.* Физико-механическая модель разрушения при ползучести // Пробл. прочности. – 1990. – № 10. – С. 23 – 28.

6. *Божидарник В. В.*, *Сулим Г. Т.* Елементи теорії пластичності та міцності: В 2 т. – Львів: Світ, 1999. – 532 с.
7. *Chen I.-W. and Argon A. S.* Creep cavitation in 304 stainless steel // Acta Met. – 1981. – **29**. – P. 1321 – 1333.
8. *Кан Р. У.*, *Хаазен П.* Физическое металловедение: В 3 т. – М.: Металлургия, 1987. – 664 с.
9. *Стрижало В. А.* Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. – Киев: Наук. думка, 1978. – 238 с.
10. *Yasniy P.*, *Halushchak M.*, *and Fedak S.* Modeling of material damage process under tensile stress with stable loading rate and application of the additional high-freguency cyclic component // Zeszyty naukowe politechniki Bialostockiej. – Mechanika. – 2001. – **24**, No. 138. – P. 477 – 481.

Поступила 20. 12. 2001