

УДК 539.434

Н. Кучер, докт. техн. наук; Р. Приходько

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України

МЕТОД ЕКСТРАПОЛЯЦІЇ ДІАГРАМ ТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ ЖАРОМІЦНИХ МАТЕРІАЛІВ

Резюме. Наведено метод прогнозування тривалої міцності матеріалів, виходячи з концепції базових діаграм. Запропоновано прості співвідношення, що зв'язують розрахункову довговічність і відповідне їй діюче напруження, визначене по базовій діаграмі. Ефективність методу проілюстровано при розрахунках довговічності сталей SUS 316-HP (18Cr-12Ni-Mo) і JIS SCM440 (2,25Cr-1Mo) для досить широких діапазонів діючих напружень і температур. Показано перевагу даного підходу відповідно найпоширеніших параметричних методів Ларсона-Міллера, Орра-Шербі-Дорна, Менсона-Саккопа, Труніна й ін.

Ключові слова: одномірна повзучість, рівняння стану, прогнозування тривалої міцності, параметричні методи.

N. Kucher, R. Prykhodko

METHOD TO EXTRAPOLATE THE STRESS-RUPTURE CURVES OF HIGH-TEMPERATURE MATERIALS

Summary. The method to predict the stress-rupture strength of materials using 3000–7000 h test data and the master-curve concept is presented. Simple formulas relating the theoretical lifetime and the corresponding stress determined from the master curve are proposed. To determine accurately the difference between the true stress and the stress found from the master curve, an approximating function of β based on available test data is used. The quantity β is the cotangent of the angle between the ordinate axis and a segment of the stress-rupture curve plotted on log-log scale.

The parameters of the approximating function can be assumed to be either invariant to the test temperature or determined from the difference between the experimental and calculated values for each isotherm. The assumption of invariance is equivalent to the hypothesis that the family of stress-rupture curves can be reduced to a unified curve. The latter approach results in a better agreement between calculated and experimental data. In some cases, however, the assumption that the parameters of the approximating function are constant allows obtaining reliable results with accuracy sufficient for practical purposes.

The method is capable of extrapolating the lifetime to values that are more than 30 times greater than the available experimental data. The efficiency of the method is illustrated by calculating the lifetime of steels SUS316-HP (18Cr-12Ni-Mo) and JIS SCM440 (2.25Cr-1Mo) for quite wide ranges of stress and temperature. The linear dependence of the mismatch function on β is used as the approximating function. Using a function rather than a set of constant parameters, as in the master curve method, always results in a better agreement between calculated and experimental data when extrapolating stress-rupture curves. It is shown that the method has advantages over the master-curve approach and popular parameters such as Larson-Miller, Orr-Sherby-Dorn, Manson-Succop, Conrad's, Korchynsky-Clauss, and Trunin's. The parameters of the linear models are calculated using multifactor linear regression.

Key words: one-dimensional creep, constitutive equation, prediction of stress rupture strength, parametric methods.

Вступ. Основні потужності теплової енергетики України побудовані в 60 – 70 роки минулого сторіччя. Більшість відповідальних елементів конструкцій уже відпрацювали свій обумовлений ресурс. Діючі нормативні документи, засновані на експериментальних даних тривалістю 3 – 7 тисяч годин, не дозволяють здійснити прогнозування міцності конструкцій на триваліші терміни експлуатації [1]. Тому розроблення методів розрахунків високотемпературної повзучості й тривалої міцності до 100 – 300 тисяч годин є актуальним завданням для інженерної практики.

Прогнозування тривалої міцності матеріалів здійснюється, виходячи з експериментальних даних, отриманих при випробуваннях зразків в умовах одновісного або складного напружених станів при дії постійних навантажень і температур [2 – 3]. Найістотніші труднощі виникають при проведенні випробувань щодо невисоких напружень і робочих температур унаслідок їх великої тривалості, що вимірювалася роками й десятиліттями. Цим і можна пояснити спроби багатьох дослідників екстраполювати результати короточасних випробувань при високих температурах на випробування при більш низьких температурах.

Не зважаючи на значну кількість методів прогнозування тривалої міцності в інженерній практиці, найбільшого поширення набули параметричні залежності Ларсона-Міллера, Орра-Шербі-Дорна, Менсона-Хеферда та ін. [4 – 6].

Параметричними називають співвідношення, які зводять опис сімейства кривих тривалої міцності до опису «єдиної» кривої, що охоплює всі температури випробувань. Тоді функцію, що апроксимує результати експериментів, можна навести у вигляді

$$\sigma = F_1(\eta) \text{ або } \tau = F_2(\eta), \quad (1)$$

де σ – діюче напруження; τ – довговічність матеріалу при $\sigma = \text{const}$; η – деякий параметр, що залежить від двох змінних, як правило $\eta = \eta(T, \tau)$; T – абсолютна температура. У випадку складного напруженого стану під σ мають на увазі еквівалентне напруження [3, 7].

Однак такі методи можуть використовуватися для опису механічної поведінки досить вузького класу матеріалів при певних обмеженнях на вид діаграм тривалого деформування. Основною перевагою параметричних методів можна вважати простоту використання й можливості вивчення за короткий термін закономірностей деформування при більш високих температурах випробувань і перенесення (екстраполяцію) їх на менші рівні температур і більші тривалості до руйнування. Крім того, вони дозволяють екстраполювати час до руйнування до значень, що в 10 разів перевищують експериментальні дані, з достатньою для технічних цілей точністю.

Для точнішого опису діаграм тривалого деформування були запропоновані методи мінімуму зв'язків, косоного зміщення, всебічного оцінення Сьодаля, метод Буккера з використанням узагальнених регресійних моделей та ін. [7]. Однак надійна екстраполяція характеристик тривалої міцності на їх основі обмежується довговічністю, яка не перевищує експериментальні дані більш ніж у 20 разів.

Інший напрямок прогнозування тривалої міцності пов'язаний з необхідністю аналізу характеру й послідовності структурних змін у матеріалі в процесі тривалого впливу навантажень і температури на основі методу узагальнених діаграм [9, 10]. Аналітичні розв'язки ряду екстра- і інтерполяційних задач у зіставленні з відомими розв'язками на основі параметричних методів свідчать про вищу вірогідність характеристик тривалої міцності, розрахованих за методом узагальнених діаграм [9].

Більш широкі можливості за тривалістю прогнозування має підхід, відомий як метод базових діаграм [11]. При цьому розрахунки тривалої міцності здійснюється на основі статистичного аналізу експериментальних і запропонованих базових діаграм з наступним оцінюванням середньої квадратичної похибки прогнозування. Перевагою такого підходу є мінімальна кількість констант, необхідних для розрахунків міцності. Отримані результати на основі методу базових діаграм краще корелюють із експериментом, ніж відомі параметричні методи. Однак є приклади, коли до достовірніших результатів при короточасовому прогнозуванні призводять параметричні співвідношення [11]. До недоліків методу базових діаграм можна віднести незакінченість досліджень з визначення діапазонів діючих напружень і температур, у межах яких використовуються пропоновані константи.

Детальніше огляд досліджень повзучості й тривалої міцності матеріалів представлено в [8, 11 – 15].

Метою даної роботи є розроблення модифікації методу базових діаграм, що дозволяє точніше прогнозувати процеси тривалого деформування, не використовуючи при цьому апарат математичної статистики. Демонстрація переваг даного методу в порівнянні з параметричними методами Ларсона-Міллера, Орра-Шербі-Дорна, Менсона-Саккопа, Конрада, Корчинського-Клаусса і Труніна при виконанні конкретних розрахунків.

1. Модифікований метод базових діаграм. Припустимо, що з експериментів нам відомі величини діючих напружень σ_i і відповідні їм довговічності τ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) при деяких фіксованих температурах T_k , ($k = 1, 2, \dots, m$). Тут m – кількість ізотерм.

Скористаємося поняттям базових діаграм деформування [11] $\tilde{\sigma}(p_i, \tau)$, які описуються співвідношеннями

$$\lg(\tilde{\sigma}(p_i, \tau)) = 3,6 - p_i \cdot [1,2 + \lg(\tau) + 0,1 \cdot \lg^2(\tau)]. \quad (2)$$

Тут p_i – деякий параметр, що залежить від координат точки, з якої здійснюється прогнозування. Для його обчислення досить підставити в (2) вираз $\tilde{\sigma} = \sigma_i$ й $\tau = \tau_i$, а потім розв'язати отримане рівняння. Іншими словами, параметр p_i забезпечує проходження базової діаграми через точку, що відповідає напруженню σ_i і довговічності τ_i .

Відзначимо, що залежно від параметра p_i змінюється не тільки положення базової кривої в площині $\lg(\sigma) - \lg(\tau)$, але і її кривизна. Чим більше значення p_i , тим менше її кривизна, що відповідає результатам експериментів [11]. Крім того, у (2) напруження $\tilde{\sigma}$ вимірюються в МПа, а час до руйнування τ – у годинах. При інших розмірностях напруження і довговічності числові значення коефіцієнтів перераховуються за відомими формулами, враховуючи співвідношення між «новими» і «старими» одиницями вимірювань, виходячи з (2). Головною особливістю базових діаграм можна вважати сталість використовуваних параметрів і добре описання поведінки багатьох матеріалів при тривалому навантаженні з їх допомогою.

Співвідношення для базової діаграми вибиралися, виходячи зі статистичного опрацювання багатьох сотень діаграм тривалої міцності [11], які використовувалися потім для уточнення прогнозованого ресурсу досліджуваних матеріалів. При визначенні констант для розрахунків міцності, використовувалася гіпотеза про те, що похибка прогнозування по напруженнях не повинна перевищувати 10 – 12 %.

На рис. 1 показані деякі фіксовані значення діаграми тривалої міцності сталі SUS 316-NP (18Cr-12Ni-Mo) [16] при $T = 750^\circ C$, апроксимуюча результатів наведених експериментів параболічна функція і базова діаграма, що проходить через координату, для якої $\lg(\sigma) = 1,869$ (друга точка згори).

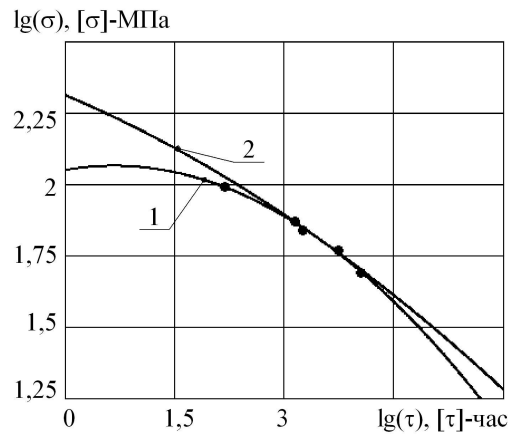


Рисунок 1. Подання апроксимуючої функції (крива 1) і базової діаграми сталі 18Cr-12Ni-Mo (крива 2) при температурі 750°C . Крапками позначені результати експериментів

Figure 1. Approximating function (curve 1) and master curve (curve 2) of 18Cr-12Ni-Mo steel at a temperature of 750°C . Circles represent experimental data

Як бачимо з рис. 1, для малих баз прогнозування розрахункові значення довговічності при використанні апроксимуючої параболічної функції і базової діаграми досить близькі між собою. Однак при збільшенні прогнозованого часу до руйнування розбіжність між ними суттєво збільшується. Точність прогнозу при використанні апроксимуючої функції залежить також від діапазону експериментальних напружень, на основі яких побудована діаграма тривалої міцності матеріалу. Усе викладене вище буде слухним і при використанні будь-якої параметричної залежності, яка використовується, насамперед, для апроксимації результатів тривалої міцності в певному діапазоні напружень і температури, а не для екстраполяції функції за межами цих інтервалів.

Для оцінки похибок, які мають місце при розрахунках довговічності по базовій діаграмі, введемо величину

$$\Delta_{in} = \lg(\sigma_n) - \lg(\tilde{\sigma}(p_i, \tau_n)). \quad (3)$$

Параметр Δ_{in} визначає різницю між логарифмом дійсного значення напруження і логарифмом напруження по базовій діаграмі при прогнозуванні довговічності на базу $\lg(\tau_n) - \lg(\tau_i)$.

Для характеристики функції $\tilde{\sigma}(p_i, \tau)$ будемо використовувати параметр β_{in} , який визначає котангенс кута нахилу до осі ординат відрізка діаграми тривалої міцності, що проходить через точки з координатами $\{\lg(\sigma_i), \lg(\tau_i)\}$ і $\{\lg(\tilde{\sigma}(p_i, \tau_n)), \lg(\tau_n)\}$. Тоді

$$\beta_{in} = \frac{\lg(\sigma_i) - \lg(\tilde{\sigma}(p_i, \tau_n))}{\lg(\tau_i) - \lg(\tau_n)}, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n-1). \quad (4)$$

З (4) випливає, що β_{in} характеризує діаграму тривалої міцності матеріалу, якщо виходити з базової діаграми.

Для оцінювання залежності між величинами Δ_{in} і β_{in} скористаємося діаграмою тривалої міцності сталі SUS 316-NP (18Cr-12Ni-Mo) [16].

Обчислені значення Δ_{in} залежно від величин β_{in} у координатах $\Delta - \beta$ для цієї сталі при температурах $600, 650, 700$ і 750°C наведені на рис. 2.

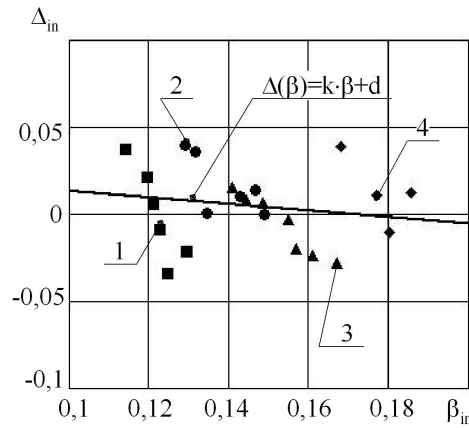


Рисунок 2. До визначення виду функції $\Delta(\beta)$ для всіх ізоTERM (600 °C (■ - 1), 650 °C (● - 2), 700 °C (▲ - 3), 750 °C (◆ - 4))

Figure 2. Identification of the function $\Delta(\beta)$ for all isotherms: 600 °C (■ - 1), 650 °C (● - 2), 700 °C (▲ - 3), 750 °C (◆ - 4)

Як бачимо з рис. 2, параметр Δ_{in} змінюється в досить вузькому діапазоні. Спостерігається тенденція звуження смуги розкиду даних при збільшенні β_{in} . Для апроксимації Δ_{in} незалежно від діючої температури в першому наближенні можна скористатися лінійною функцією

$$\Delta(\beta) = k \cdot \beta + d. \quad (5)$$

Після визначення її параметрів, виходячи з методу найменших квадратів, обчислимо величину $\beta_{n,n+1}$ і спад напруження $\Delta(\beta_{n,n+1})$, що відповідає довговічності τ_n і τ_{n+1} , використовуючи вирази (5) і (4). Прогнозована величина логарифма напруження σ_{n+1} , відповідного довговічності τ_{n+1} , визначається з виразу (3) за умови $i = n$, $n = n + 1$. Тоді

$$\lg(\sigma_{n+1}) = \Delta(\beta_{n,n+1}) + \lg(\tilde{\sigma}(p_n, \tau_{n+1})). \quad (6)$$

Відзначимо, що використання співвідношення (5) для екстраполяції параметрів тривалої міцності рівносильне зведенню сімейства діаграм тривалої міцності до «єдиної» кривої, як це спостерігалось в методиках розрахунків за параметричними методами. Дана методика дозволяє точніше визначити інтегральні параметри для оцінювання тривалих характеристик, враховуючи розкид експериментальних даних, виходячи з усього сімейства ізоTERM.

Таким чином, при даному підході передбачається інше визначення параметра β , ніж у МБД [11], представлення залежності $\Delta - \beta$ у вигляді лінійної функції, використовуються інші співвідношення для обчислення прогнозованого напруження при заданій довговічності. При цьому відпадає необхідність у громіздких статистичних опрацюваннях результатів експериментів на тривалу міцність матеріалів і підвищується точність прогнозування.

2. Короткий опис параметричних методів прогнозування. Наведемо найвідоміші співвідношення, що пов'язують діюче постійне напруження σ , довговічність τ й абсолютну температуру T , які будемо використовувати для порівняння ефективності різних підходів.

У роботі розглядаються лінійні моделі типу:

а) Ларсона – Міллера [4]

$$\lg(\tau) = A_0 + A_1 T^{-1} + A_2 T^{-1} \lg(\sigma) + A_3 T^{-1} \lg^2(\sigma), \quad (7)$$

б) Орра – Шербі – Дорна [5]

$$\lg(\tau) = A_0 + A_1 \lg(\sigma) + A_2 \lg^2(\sigma) + A_3 T^{-1}, \quad (8)$$

в) Менсона – Саккопа [17]

$$\lg(\tau) = A_0 + A_1 \lg(\sigma) + A_2 \lg^2(\sigma) + A_3 T, \quad (9)$$

г) Конрада [17]

$$\lg(\tau) = A_0 + A_1 \sigma + A_2 T \sigma + A_3 T^{-1}, \quad (10)$$

д) Корчинського – Клаусса [17]

$$\lg(\tau) = A_0 + A_1 \lg(\sigma) + A_2 T \lg^2 \sigma + A_3 T^{-1}, \quad (11)$$

е) Труніна [18]

$$\lg(\tau) = 2 \lg(T) + (A_0 + A_1 \lg(\sigma) + A_2 \sigma \cdot T^{-1} + A_3 T^{-1}) \cdot \lg(e). \quad (12)$$

У співвідношеннях (7) – (12) A_k ($k = 0, 1, 2, 3$) постійні параметри. Для конкретизації параметрів співвідношень (7) – (12) найкраще скористатися багатофакторною лінійною регресією математичної статистики [19].

Позначимо незалежні змінні при параметрах A_k за допомогою матриці X , а залежні – через вектор-стовпчик Y . Тоді, наприклад, X і Y для моделі (7) мають вигляд

$$X = \begin{bmatrix} 1 & T_1^{-1} & T_1^{-1} \lg(\sigma_1) & T_1^{-1} \lg^2(\sigma_1) \\ 1 & T_2^{-1} & T_2^{-1} \lg(\sigma_2) & T_2^{-1} \lg^2(\sigma_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & T_n^{-1} & T_n^{-1} \lg(\sigma_n) & T_n^{-1} \lg^2(\sigma_n) \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} \lg(\tau_1) \\ \lg(\tau_2) \\ \dots \\ \lg(\tau_n) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Тут σ_i, τ_i, T_i ($i = 1, 2, \dots, n$) – результати експериментів на тривалу міцність. Вважається, що T_i постійне в межах однієї ізотерми.

Відповідно для моделі (12) аналогічні матриці визначаємо співвідношеннями

$$X = \begin{bmatrix} 1 & \lg(\sigma_1) & \sigma_1 T_1^{-1} & T_1^{-1} \\ 1 & \lg(\sigma_2) & \sigma_2 T_2^{-1} & T_2^{-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \lg(\sigma_n) & \sigma_n T_n^{-1} & T_n^{-1} \end{bmatrix}, \quad Y = \frac{1}{\lg(e)} \begin{bmatrix} \lg(\tau_1 / T_1^2) \\ \lg(\tau_2 / T_2^2) \\ \dots \\ \lg(\tau_n / T_n^2) \end{bmatrix}. \quad (13a)$$

Для інших параметричних співвідношень матриця X і вектор-стовпчик Y формуються, виходячи з виразів (8) – (11).

Відповідно до лінійного регресійного аналізу [19] коефіцієнти регресії визначаються виразом

$$A = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y, \quad (14)$$

де X^T – матриця, транспонована до X , а X^{-1} – обернена до неї. У нашому випадку

$$A^T = (A_0 \ A_1 \ A_2 \ A_3). \quad (15)$$

При використанні даного підходу можна визначити з необхідною точністю не тільки параметри A_k , але й обчислити дисперсію характеристик тривалої міцності, оцінити дисперсію адекватності вихідних моделей і ступінь відповідності використовуваних співвідношень для опису всієї експериментальної сукупності.

3. Порівняння прогнозованих результатів. Для аналізу ефективності запропонованого підходу скористаємося діаграмами тривалої міцності сталі 12Cr-18Ni-Mo [16] при чотирьох фіксованих значеннях температури (див. рис. 3). Прогнозування будемо виконувати, виходячи з останньої координати, якою закінчується суцільна лінія ізотерми, на базу відповідної довговічності останньої точки ізотерми. Отже, для обчислення характеристик матеріалу залучається вибірка експериментальних значень за винятком координат даних, з'єднаних пунктирною лінією при кожній температурі.

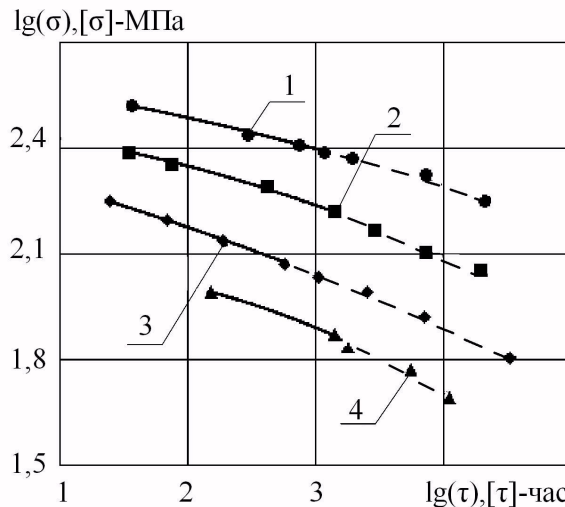


Рисунок 3. Діаграми тривалої міцності сталі 12Cr-18Ni-Mo [15] при різних фіксованих температурах (600°C (● - 1), 650°C (■ - 2), 700°C (◆ - 3), 750°C (▲ - 4))

Figure 3. Stress-rupture curves of 12Cr-18Ni-Mo steel [15] at temperatures of 600°C (● - 1), 650°C (■ - 2), 700°C (◆ - 3), and 750°C (▲ - 4)

Проаналізуємо ефективність даного підходу, методу базових діаграм та параметричних співвідношень Ларсона – Міллера, Орра – Шербі – Дорна, Менсона – Саккопа, Конрада, Корчинського – Клаусса і Труніна.

Для опрацювання даних відповідно до запропонованого методу прогнозування нам потрібні параметри $k = -0,027, d = 0,025$, які визначали, виходячи з методу найменших квадратів для виразу (5).

Для конкретизації параметричних співвідношень, представлених у розд. 2, будемо

використовувати співвідношення (14), виходячи зі згаданої вище вибірки характеристик тривалої міцності $\{\sigma_i, \tau_i, T_i\}$. Шукані значення напружень σ_{n+1} , що відповідають довговічності τ_{n+1} , визначаються в результаті чисельного розв'язку рівнянь (7) – (12). Отримані таким чином результати розрахунків наведено в табл. 1.

Під порядком прогнозування мають на увазі величину $q = \lg(\tau_{n+1} / \tau_n)$, де τ_{n+1} – довговічність, для якої прогнозується величина діючого напруження.

Аналогічна відповідність експериментальних і прогнозованих величин діючих напружень при використанні зазначених вище підходів має місце і для сталі 2,25Cr-1Mo [20] (див. табл. 2).

Аналізуючи дані з табл. 1 – 2, зазначимо, що чим вище порядок прогнозування, тим краще видно переваги запропонованого підходу. Використання функції замість набору постійних параметрів β_i [12], яка апроксимує аналогічні величини, завжди призводить до точнішої відповідності розрахункових і експериментальних даних. Відзначимо, що даний підхід не вимагає статистичного опрацювання результатів експериментів і використання гіпотези про можливий 12-ти процентний розкид даних по тривалій міцності [12].

Таблиця 1

Прогнозовані значення напружень діаграми тривалої міцності сталі 18Cr-12Ni-Mo при використанні різних підходів

T, °C	Порядок прогнозування, q	Експериментальні значення, МПа	ММБД, МПа	МБД, МПа	Метод Ларсона – Міллера, МПа	Метод Орра – Шербі – Дорна, МПа	Метод Менсона – Саккопа, МПа	Метод Конрада, МПа	Метод Корчинського – Клаусса, МПа	Метод Труніна, МПа
600	1,26	177,0	175,9	179,2	184,3	182,2	179,5	176,0	190,9	183,4
650	1,14	113,0	118,5	121,1	123,8	119,8	123,3	107,0	124,2	120,2
700	1,76	64,0	62,1	68,1	74,7	69,3	75,5	48,8	74,8	71,4
750	0,90	49,0	52,9	54,1	53,9	49,0	54,6	32,9	54,3	53,5

Таблиця 2

Прогнозовані значення напружень діаграми тривалої міцності сталі
2,25Cr-1Mo при використанні різних підходів

T, °C	Порядок прогнозування, q	Експериментальні значення, МПа	ММБД, МПа	МБД, МПа	Метод Ларсона – Міллера, МПа	Метод Орра – Шербі – Дорна, МПа	Метод Менсона – Саккопа, МПа	Метод Конрада, МПа	Метод Корчинського – Клаусса, МПа	Метод Труніна, МПа
450	2,06	265	243,5	289,7	283,1	272,5	279,0	274,2	274,9	283,7
500	1,81	157	176,3	218,7	206,5	190,3	208,0	192,2	203,5	205,8
550	1,81	78	114,8	155,8	146,4	111,8	147,7	133,5	161,0	149,9

Запропонований метод може бути поліпшений за рахунок більш вдалого вибору апроксимуючої функції $\Delta(\beta)$, яка точніше описує експериментальні дані, або в результаті використання інших базових функцій, визначених для опису тривалого деформування тільки даного матеріалу.

Висновки. Подано новий метод прогнозування тривалої міцності матеріалів, виходячи з концепції базових діаграм. Викладено методику конкретизації параметрів визначальних співвідношень на основі експериментальних значень діаграм тривалої міцності матеріалів обмеженої бази. Метод дозволяє екстраполювати довговічність до значень у 30 і більше разів, які перевищують результати експериментів, з достатньою для технічних цілей точністю. Продемонстровані його переваги в порівнянні з методом базових діаграм і відомими параметричними методами Ларсона – Міллера, Орра – Шербі – Дорна, Менсона – Саккопа, Конрада, Корчинського – Клаусса і Труніна.

Conclusion. A new method to predict the stress-rupture strength of materials based on the master-curve concept has been presented. It has been explained how to determine the parameters of the constitutive equations from experimental stress-rupture curves with limited time-to-rupture range. The method is capable of extrapolating, with adequate accuracy, the lifetime to values that are more than in 30 times of magnitude greater than the available experimental data. It has been shown that the method has advantages over the master-curve approach and popular parameters such as Larson-Miller, Orr-Sherby-Dorn, Manson-Succop, Conrad's, Korchynsky-Clauss, and Trunin's.

Список використаної літератури

1. РТМ 108.031.112-80. Котлы стационарные паровые и водогрейные и трубопроводы пара и горячей воды. Метод оценки долговечности колен трубопроводов.
2. Работнов, Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций [Текст] / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
3. Локощенко, А.М. Длительная прочность металлов при сложном напряженном состоянии (обзор) [Текст] / А.М. Локощенко // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2012. – № 3. – С. 116 – 156.
4. Larson, F.R. Time temperature relationship for rupture and creep stresses [Text] / F.R. Larson, J. Miller // Trans. ASME. – 1952. – 74, No 5. – P. 765 – 775.

5. Orr, R.L. Correlation of rupture data for metals at elevated temperatures [Text] / R.L. Orr, O.D. Sherby, J.E. Dorn // Trans. ASM. – 1954. – 46. – P. 113 – 128.
6. Manson, S.S. A linear time-temperature relation for extrapolation of creep and stress rupture data [Text] / S.S. Manson, A.M. Haferd // NASA TN 2890. – 1953.
7. Локощенко, А.М. Моделирование процесса ползучести и длительной прочности металлов [Текст] / А.М. Локощенко. – М.: МГИУ. – 2007. – 264 с.
8. Manson, S.S. A quarter-century of progress in the development of correlation and extrapolation me rupture data [Text] / S.S. Manson, C.R. Ensign // Trans. ASME. – 1979. – V. 101. – P. 317 – 325.
9. Ковпак, В.И. Прогнозирование жаропрочности металлических материалов [Текст] / В.И. Ковпак. – Киев: Наук. думка, 1981. – 240 с.
10. Закономерности ползучести и длительной прочности: справочник [Текст]; под. общ. ред. С.А. Шестерикова. – М.: Машиностроение, 1983. – 102 с.
11. Прочность материалов и конструкций: серия монографий [Текст]; под ред. В.Т. Трошенко. – Киев: Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины. – 2012. – Т. 5. – Прогнозирование высокотемпературной ползучести и длительной прочности / В.В. Кривенюк. – 2012. – 752 с.
12. Шестеряков, С.М. Ползучесть и длительная прочность металлов [Текст] / С.М. Шестеряков, А.М. Локощенко // Итоги науки и техники. Сер. Механика деформируемого твердого тела. – М.: ВИНТИ, 1980. – Т. 13. – С. 3 – 104.
13. Голуб, В.П. Высокотемпературное разрушение материалов при циклическом нагружении [Текст] / В.П. Голуб, А.Д. Погребняк. – Киев: Наук. думка, 1994. – 228 с.
14. Ромашов, Р.В. Определение характеристик длительной прочности материалов по результатам испытаний ограниченной длительности [Текст] / Р.В. Ромашов // Успехи современного естествознания. – 2006. – № 11. – С. 69 – 71.
15. Назаров, В.В. Экспериментальное исследование ползучести и длительной прочности металлов при одноосном и сложном напряженных состояниях [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук. / В.В. Назаров. – Москва, 2007. – 18 с.
16. Data sheets on the elevated-temperature stress relaxation properties of 18Cr-12Ni-Mo hot rolled stainless steel plate (SUS 316-HP) // NIRM Creep Data Sheet. – 1996 – No 42. – P. 1 – 25.
17. Raut, P.K. Computerized Evaluations of the Relative Abilities of Seven Time-Temperature Parameters to Correlate and Extrapolate Nickel-Alloy Stress-Rupture Data [Text] / P.K. Raut, W.R. Clough // Trans. ASME. – 1972. – V. 94. – P. 7 – 12.
18. Трунин, И.И. Механическое уравнение состояния металлических материалов и прогнозирование характеристик жаропрочности [Текст] / И.И. Трунин // Пробл. прочности. – 1976. – №9. – С. 9 – 13.
19. Орлов, А.И. Прикладная статистика [Текст] / А.И. Орлов. – М.: Экзамен, 2004. – 656 с.
20. Micrographs and microstructural characteristics of crept specimens of 2,25Cr-1Mo steel tube for boiler and heat exchanger (JIS STBA24), normalized and tempered 2,25Cr-1Mo steel plate for boiler and pressure vessels (JIS SCM V 4NT) and quenched and tempered 2,25Cr-1Mo steel plate for pressure vessels (ASTM A542) // NIMS. – 2005. – No M-4. – P. 1 – 217.

Отримано 11.02.2013