

## Достовірність температурно-часової екстраполяції діаграм тривалої міцності жароміцних сталей

М. К. Кучер, Р. П. Приходько

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

*Наведено аналіз результатів екстраполяції діаграм тривалої міцності жароміцних сталей за допомогою відомих параметричних методів та модифікованого методу базових діаграм. Розглядаються два варіанти моделі: якщо гіпотеза “єдиної” кривої справедлива, і якщо її використання призводить до істотних похибок при прогнозуванні тривалих процесів деформування. Продемонстровано ефективність запропонованих методик та їх переваги перед іншими підходами.*

**Ключові слова:** екстраполяція, параметричні методи, діаграми тривалої міцності, модифікований метод базових діаграм.

**Вступ.** На сьогодні в Україні досить гостро стоїть проблема подовження ресурсу відповідальних елементів конструкцій тривалого використання, зокрема в теплоенергетиці. Основою для аналізу стану конструкцій і можливості їх подальшої експлуатації служать діаграми тривалої міцності матеріалів. Останні отримують із результатів випробувань зразків в умовах одновісного або складного напружених станів при дії постійних напружень і температури [1–5]. Випробування на тривалу міцність можуть продовжуватись від кількох днів до десятків років. Тому створення математичних моделей прогнозування тривалої міцності було і залишається актуальною задачею інженерної практики.

Незважаючи на велику кількість методів прогнозування тривалої міцності матеріалів, найбільшого розповсюдження на практиці отримали параметричні залежності Ларсона–Міллера, Орра–Шербі–Дорна, Менсона–Хеферда, Труніна та ін. [6–9].

Параметричними називаються співвідношення, які зводять опис сімейства кривих тривалої міцності до опису “єдиної” кривої, що охоплює всі температури випробувань. Тоді функція, що апроксимує результати експериментів, може бути записана у вигляді

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

де  $\sigma$  – діюче напруження;  $\tau$  – довговічність матеріалу при  $\sigma = \text{const}$ ;  $\eta$  – деякий параметр, що залежить від двох змінних, як правило,  $\eta = \eta(T, \tau)$ ;  $T$  – абсолютна температура. У випадку складного напруженого стану під  $\sigma$  розуміють еквівалентне напруження [1, 2].

Параметричні методи можуть використовуватись для опису механічної поведінки середовищ за певних обмежень на вид діаграм тривалої міцності матеріалів. Основними їх перевагами є простота використання і можливість вивчення за коротші терміни закономірностей деформування при більш високих температурах випробувань і перенесення (екстраполяція) на менші рівні температур і більші тривалості до руйнування.

Зазначимо, що спочатку дані методи використовувалися для інтерполяційної оцінки відомих експериментальних даних. І лише пізніше їх почали застосовувати для екстраполяції тривалої міцності, що є доцільним для довговічностей, які не перевищують одного порядку логарифмічної шкали часу.

Дещо інший підхід при оцінці тривалої міцності використовується в методі узагальнених діаграм В. І. Ковпака [10]. Для точнішого опису статистично осереднених діаграм тривалого деформування пропонується враховувати також структурний стан матеріалів. Після встановлення температурних інтервалів з однаковим характером структурних змін на основі результатів випробувань при більш високих температурах на обмеженій базі визначаються межі перехідних областей з різними типами руйнування, після чого – величина напруження, що забезпечує необхідну довговічність. Даний метод у порівнянні з параметричними дає можливість здійснювати прогнозування на більшу довговічність.

Значно ширші можливості щодо тривалості прогнозування має метод базових діаграм (МБД) В. В. Кривенюка [5]. При цьому розрахунки характеристик тривалої міцності матеріалів здійснюються на основі статистичного аналізу експериментальних кривих і запропонованих базових діаграм із наступною оцінкою середньої квадратичної похибки прогнозування. Отримані результати за цим методом краще корелюють з експериментом на великі бази прогнозування порівняно з іншими вищезазначеними методами. Разом із тим в [4] є приклади розрахунків, коли більш достовірні результати при коротко-часовому прогнозуванні отримано за допомогою параметричних співвідношень. До переваг методу відносять також невелику кількість констант у визначальних співвідношеннях. Недолік методу полягає у незавершеності досліджень щодо визначення інтервалів температур і діючих напружень, у межах яких можуть використовуватись визначальні параметри при прогнозуванні довговічності жароміцних сталей.

В роботі [11] запропоновано нову методику прогнозування тривалої міцності з урахуванням базових діаграм [5]. Але значення напружень при вибраній довговічності уточнюються за допомогою функції-нев'язки. Якщо в методі базових діаграм [5] відшукується набір констант, то в модифікованому методі – параметри функції-нев'язки.

Запропоновано два варіанти такого підходу: перший – параметри функції-нев'язки є інваріантними до температури, тобто, якщо справедлива гіпотеза єдиної кривої; другий – параметри вважаються функціями від температури. Такий підхід дозволяє точніше проводити інтерполяцію й екстраполяцію тривалої міцності.

Метою даної роботи є формулювання гіпотез, що лежать в основі модифікованого методу базових діаграм та демонстрація його ефективності, в тому числі за наявності обмеженої бази даних тривалої міцності матеріалів.

Зазначимо, що гіпотеза єдиної кривої лежить в основі всіх параметричних методів.

**Ефективність екстраполяції діаграм тривалої міцності матеріалів на основі параметричних залежностей.** Вищезазначені методи [6–9] в інженерній практиці широко використовуються як для інтерполяції, так і екстраполяції діаграм тривалої міцності матеріалів. Можливості такого прогнозування розглядалися у [11–13].

Для аналізу обмежень при використанні вищезгаданих підходів скористаємося залежностями Ларсона–Міллера та вкажемо на вимоги до експериментальних даних, що використовуються для конкретизації визначальних співвідношень. Приблизно такі ж можливості мають й інші параметричні методи.

Залежності Ларсона–Міллера пов'язують діюче постійне напруження  $\sigma$ , довговічність  $\tau$  і абсолютну температуру  $T$  за допомогою співвідношення [7]

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

де  $A_k$  ( $k = 0, 1, 2, 3$ ) – постійні параметри, що визначаються з експериментальних даних, які описують тривалу міцність матеріалу. Для їх конкретизації скористаємося однофакторною регресією математичної статистики [14].

Будемо вважати, що з експериментів відомо величини діючих напружень  $\sigma_i$  і відповідні їм довговічності  $\tau_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) при деяких фіксованих температурах  $T_k$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ), де  $m$  – кількість ізотерм. Підставимо координати кожної точки і експериментальні значення температури в співвідношення (2) і отримаємо систему лінійних рівнянь, яка значно перевищує кількість невідомих.

Позначимо незалежні змінні при параметрах  $A_k$  через матрицю  $X$ , а залежні змінні – через вектор-стовпчик  $Y$ . Тоді запишемо

$$X = \begin{bmatrix} 1 & T_1^{-1} & T_1^{-1} \lg(\sigma_1) & T_1^{-1} \lg^2(\sigma_1) \\ 1 & T_2^{-1} & T_2^{-1} \lg(\sigma_2) & T_2^{-1} \lg^2(\sigma_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & T_m^{-1} & T_m^{-1} \lg(\sigma_n) & T_m^{-1} \lg^2(\sigma_n) \end{bmatrix}; \quad Y = \begin{bmatrix} \lg(\tau_1) \\ \lg(\tau_2) \\ \dots \\ \lg(\tau_n) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Відповідно до лінійного регресійного аналізу [13] коефіцієнти регресії визначаються виразом

$$A = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (4)$$

де  $X^T$  – транспонована матриця відносно  $X$ , а  $X^{-1}$  – обернена матриця. У нашому випадку маємо

$$A^T = (A_0 \quad A_1 \quad A_2 \quad A_3). \quad (5)$$

За допомогою даного підходу можна визначити з необхідною точністю не тільки параметри  $A_k$ , а й обчислити дисперсію характеристик тривалої міцності, оцінити дисперсію адекватності вихідних моделей та ступінь відповідності співвідношень, що використовуються для опису всієї експериментальної сукупності.

Зі співвідношення (4) видно, що дана задача має єдиний розв'язок, якщо визначник матриці  $(X^T X)$  не дорівнює нулю. Якщо він близький до нуля, то коректно розрахувати характеристики  $A_k$  не завжди вдається.

На рис. 1 наведено розрахунки кривих тривалої міцності сталі 18Cr–12Ni–Nb [15] на основі співвідношень Ларсона–Міллера. Там же представлено експериментальні величини (темні точки), що відрізняються від передостанньої точки по довговічності приблизно на один порядок для кожної ізотерми (світлі точки).

Як видно, лише для ізотерм 1 (600°C) і 2 (650°C) можна отримати екстрапольовані значення напружень із певною похибкою, для ізотерм 3 (700°C) і 4 (750°C) взагалі не вдається отримати відповідних результатів.

Аналогічні результати отримано при використанні інших параметричних методів. В табл. 1 наведено відповідні розрахунки на основі методів Ларсона–Міллера (ЛМ), Орра–Шербі–Дорна (ОШД), Менсона–Саккопа (МС), Конрада (К), Корчинського–Клауса (КК) та Труніна (Т) для даного матеріалу. Там же вказано порядки екстраполяції  $q$  для кожної кривої. Параметричні співвідношення для опису кривих тривалої міцності приведено в [6–9, 12].

Відсутність екстрапольованої величини для відповідного методу свідчить про те, що її взагалі не можна розрахувати на основі наведених експериментальних даних для приведенного порядку прогнозування.

Отже, використання параметричних співвідношень для прогнозування кривих тривалої міцності може призвести до істотних похибок навіть при порядках прогнозування менших, ніж одиниця ( $q \leq 1$ ). Похибка при екстраполяції зростатиме при підвищенні температури і буде залежати від величини визначника матриці  $(X^T X)$ .

Т а б л и ц я 1

**Екстраполяційний аналіз даних сталі 18Cr–12Ni–Nb  
при використанні різних підходів**

T, °C	q	Експериментальні значення, МПа	Розрахункові, МПа, за методами					
			ЛМ	ОШД	МС	К	КК	Т
600	1,3	108	125	119	119	106	133	121
650	1,0	78	80	–	75	57	88	77
700	1,2	41	–	–	–	13	56	43
750	1,3	37	–	–	–	2	41	31

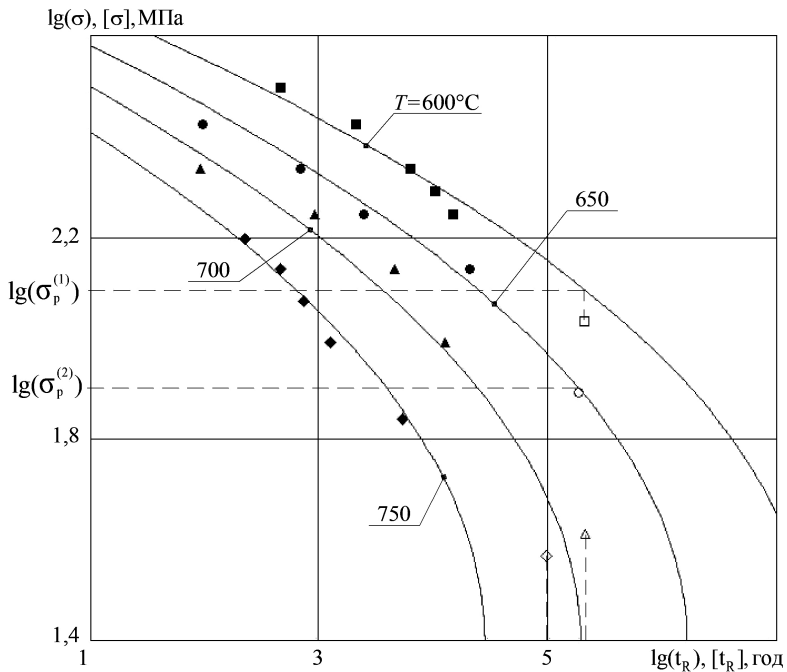


Рис. 1. Криві тривалої міцності сталі 18Cr–12Ni–Nb та апроксимація за допомогою співвідношень Ларсона–Міллера (суцільні лінії).

**Основні гіпотези модифікованого методу базових діаграм (ММБД).** Даний метод дозволяє проводити достовірну екстраполяцію на довговічність до 2,5 порядків логарифмічної шкали часу [11].

В основі методу лежить поняття базової діаграми, яка описується співвідношенням [5]

$$\lg(\tilde{\sigma}(p_i, \tau)) = 3,6 - p_i [12 + \lg(\tau) + 0,1 \lg^2(\tau)], \quad (6)$$

де  $\lg(\tilde{\sigma}(p_i, \tau))$  – логарифм напруження по базовій діаграмі;  $\tau$  – довговічність;  $p_i$  – параметр, що залежить від координати точки, з якої здійснюється прогнозування.

Аналіз відомих із літературних джерел діаграм тривалої міцності до 300 тисяч годин і більше у логарифмічних координатах показує, що всі вони випуклі і не мають точок перегину. Тому було запропоновано як перше наближення при екстраполяції діаграм використовувати базові криві виду (6). Питання про обмеженість такого підходу в [4] не розглядалось.

Виходячи з фізичних міркувань, крива, яка використовується при екстраполяції відповідних діаграм при достатньо малих величинах напруження, повинна мати точку перегину. Окрім того, при  $\tau \rightarrow \infty$  величина напруження має дорівнювати нулю. Однак на практиці на сьогодні відсутні експериментальні дані, які б підтверджували цей факт. Вважатимемо, що такі міркування справедливі лише для дуже малих значень напруження. Тому питання щодо обмеження використання базової діаграми виду (6) залишається відкритим.

Друга гіпотеза, яка використовується в першому варіанті модифікованого методу базових діаграм, це гіпотеза єдиної кривої. У цьому випадку для конкретизації параметрів функції-нев'язки використовують сімейство діаграм тривалої міцності.

Якщо гіпотеза єдиної кривої призводить до значних похибок або якщо обмежена база даних про діаграми тривалої міцності, пропонується проводити конкретизацію визначальних співвідношень для кожної ізотерми.

**Конкретизація визначальних співвідношень й екстраполяція діаграм тривалої міцності на основі гіпотези єдиної кривої.** Для викладення суті запропонованого методу скористаємося експериментальними даними щодо тривалої міцності сталі 18Cr–8Ni [16] (рис. 2).

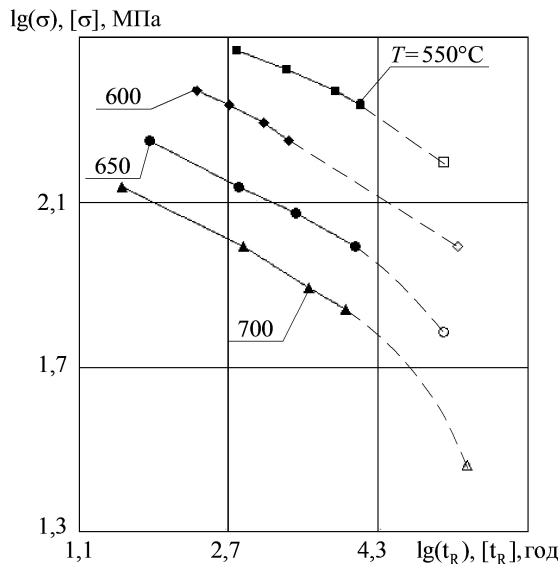


Рис. 2. Криві тривалої міцності сталі 18Cr–8Ni: темні точки – експериментальні результати, для яких буде виконуватись екстраполяція діаграм тривалої міцності матеріалів; світлі точки – дані порівняння прогнозування з експериментом.

Введемо поняття функції-нев'язки  $\Delta$ , що визначає різницю між експериментальними значеннями напружень і відповідними значеннями, отриманими по базовій діаграмі. Тоді її величина при прогнозуванні з  $i$ -ї точки в точку  $n$  визначається співвідношенням [11]

$$\Delta_{in} = \lg(\sigma_i) - \lg(\tilde{\sigma}(p_i, \tau_n)), \quad i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (7)$$

Припустимо, що дана функція залежить від безрозмірного параметра  $\beta_{in}$ , який дорівнює котангенсу кута нахилу до осі ординат відрізка гіпотетичної діаграми тривалої міцності, що проходить через дві точки  $\{\lg(\sigma_i), \lg(\tau_i)\}$  і  $\{\lg(\tilde{\sigma}(p_i, \tau_n)), \lg(\tau_n)\}$ . У результаті отримаємо

$$\beta_{in} = \frac{\lg(\sigma_i) - \lg(\tilde{\sigma}(p_i, \tau_n))}{\lg(\tau_i) - \lg(\tau_n)}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (8)$$

Розраховані значення функції  $\Delta_{in}$  в залежності від величини параметра  $\beta_{in}$  для сталі 18Cr–8Ni [16] приведено на рис. 3.

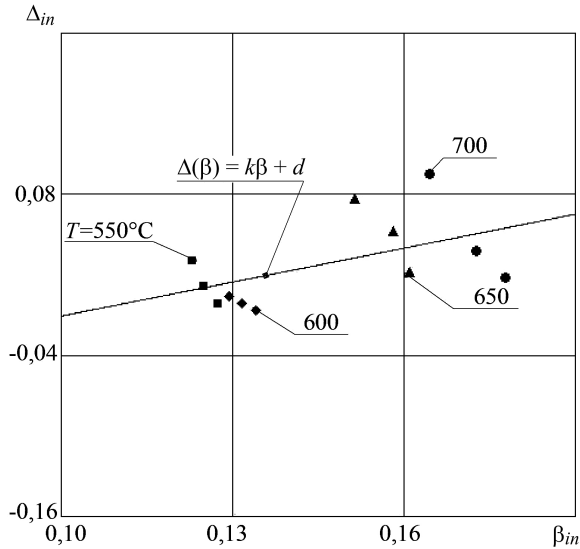


Рис. 3. Графічна інтерпретація функції-нев'язки сталі 18Cr–8Ni.

Як видно, значення функції-нев'язки змінюється в досить вузькому діапазоні. Відповідно до гіпотези єдиної кривої постулюватимемо, що її параметри інваріантні до температури випробувань. Тоді для апроксимації функції  $\Delta$  можна скористатися лінійною функцією виду

$$\Delta(\beta) = k\beta + d. \quad (9)$$

Після обчислення її параметрів методом найменших квадратів із використанням усіх експериментальних результатів, наведених на рис. 3, отримаємо  $k = 0,84$ ;  $d = -0,095$ .

Прогнозована величина логарифма напруження  $\sigma_{n+1}$ , що відповідає довговічності  $\tau_{n+1}$ , визначається зі співвідношення

$$\lg(\sigma_{n+1}) = \Delta(\beta_{n,n+1}) + \lg(\tilde{\sigma}(p_n, \tau_{n+1})), \quad (10)$$

де  $\beta_{n,n+1}$  – величина, що визначається на основі (8) при заміні  $i$  індексом  $n$ , а  $n - n + 1$ ;  $\Delta(\beta_{n,n+1})$  – значення функції-нев'язки (9).

Результати екстраполяції діаграм тривалої міцності сталей 18Cr–8Ni [16], 5Cr–0,5Mo [17] та 2,25Cr–1Mo [18] наведено в табл. 2, 3 та 4 відповідно. Там же для порівняння ефективності методик прогнозування представлено результати випробувань і розрахунків на основі методів Ларсона–Міллера і Труніна.

Наведені результати підтверджують, що кращий збіг з експериментом для кожної кривої отримано на основі запропонованого алгоритму. Зазначимо, що при більших порядках прогнозування отримані значення екстраполяції точніші, ніж при використанні інших відомих методів.

Т а б л и ц я 2

**Прогнозування тривалої міцності на задану довговічність сталі 18Cr–8Ni**

T, °C	q	$\sigma_e$ , МПа	$\sigma$ , МПа, за методами		
			ММБД	ЛМ	Т
550	0,9	157	171	174	175
600	1,8	98	102	111	109
650	1,0	61	76	77	75
700	1,3	29	42	48	46

Т а б л и ц я 3

**Прогнозування тривалої міцності на задану довговічність сталі 5Cr–0,5Mo**

T, °C	q	$\sigma_e$ , МПа	$\sigma$ , МПа, за методами		
			ММБД	ЛМ	Т
500	1,2	98	107	111	105
550	0,8	53	55	55	59
600	1,4	29	30	37	31

Т а б л и ц я 4

**Прогнозування тривалої міцності на задану довговічність сталі 2,25Cr–1Mo**

T, °C	q	$\sigma_e$ , МПа	$\sigma$ , МПа, за методами		
			ММБД	ЛМ	Т
450	2,06	265	243,5	283,1	283,7
500	1,81	157	176,3	206,5	205,8
550	1,81	78	114,8	146,4	149,9

**Прогнозування тривалої міцності при обмеженій експериментальній вибірці.**

Отримання діаграм тривалої міцності для широкого діапазону напружень і температур вимагає значних затрат від замовника. Разом із тим в інженерній практиці часто виникає необхідність в екстраполяції діаграм тривалої міцності при обмеженій вибірці експериментальних даних, наприклад, отриманих лише за однієї температури. У цьому випадку параметричні методи взагалі не дозволяють одержати необхідні величини.

Другий варіант модифікованого методу базових діаграм, якщо не виконується гіпотеза єдиної кривої або експериментальна вибірка обмежена, дозволяє визначати параметри функції-нев'язки, вважаючи їх залежними від температури. На основі експериментальних даних для однієї ізотерми можна визначити характеристики моделі і проводити екстраполяцію для обмеженого набору експериментальних даних.

На рис. 4 показано функції-нев'язки [16], розраховані на основі експериментальних даних для кожної ізотерми. У даному випадку також обмежилися простими лінійними залежностями.

Як видно, характер поведінки функцій-нев'язки однаковий для всіх температур.

Результати такого дослідження представлено в табл. 5 і 6 для сталей 18Cr–8Ni [16] та 5Cr–0,5Mo [17] відповідно.

Т а б л и ц я 5

**Прогнозування тривалої міцності на задану довговічність сталі 18Cr–8Ni за другим варіантом моделі**

T, °C	q	σ <sub>e</sub> , МПа	σ, МПа, за методами			δ <sub>i</sub> = [(σ <sub>e</sub> - σ <sub>p</sub> )/σ <sub>e</sub> ] · 100%, за методами		
			ММБД	ЛМ	Т	ММБД	ЛМ	Т
550	0,9	157	142	178	176	10	13	12
700	1,3	29	32	47	47	10	62	62

Т а б л и ц я 6

**Прогнозування тривалої міцності на задану довговічність сталі 5Cr–0,5Mo за другим варіантом моделі**

T, °C	q	σ <sub>e</sub> , МПа	σ, МПа, за методами			δ <sub>i</sub> = [(σ <sub>e</sub> - σ <sub>p</sub> )/σ <sub>e</sub> ] · 100%, за методами		
			ММБД	ЛМ	Т	ММБД	ЛМ	Т
500	1,2	98	107	120	112	4	23	14
600	1,4	29	30	39	31	7	35	7

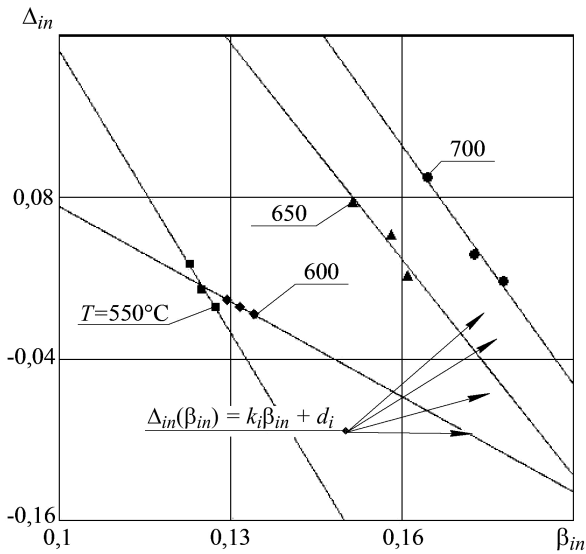


Рис. 4. Графічна інтерпретація функції-нев'язки для кожної ізотерми.

Якщо досліджувати можливість екстраполяції діаграм для кількох ізотерм, то температурні залежності  $k_i(T)$  і  $d_i(T)$  визначаються шляхом інтерполяції отриманих величин на основі методу найменших квадратів. У цьому випадку тип функції-нев'язки повинен бути однаковим для всіх ізотерм.

**Висновки**

1. На основі отриманих експериментальних даних та відомих із літературних джерел запропоновано новий метод екстраполяції діаграм тривалої міцності мате-



ріалів для довговічностей 300 тисяч годин і більше, що базується на результатах короткочасних випробувань.

2. Прогнозування тривалих процесів деформування проводиться за допомогою базових діаграм і функції-нев'язки. Запропоновано два варіанта моделі: якщо для сімейства діаграм тривалої міцності матеріалів справедлива гіпотеза єдиної кривої і якщо таке припущення призводить до значних похибок. Сформульовано гіпотези, що лежать в основі модифікованого методу базових діаграм, та представлено методики конкретизації параметрів запропонованих визначальних співвідношень.

3. Продемонстровано переваги підходу ММБД при екстраполяції діаграм тривалої міцності в порівнянні з методами Ларсона–Міллера, Орра–Шербі–Дорна, Менсона–Хеферда, Труніна та методом базових діаграм В. В. Кривенюка. Визначено межі використання розрахункових характеристик матеріалів для робочих діапазонів напруження і температури.

4. Представлено порівняльний аналіз прогнозування довговічностей на основі обмеженої (одна-дві ізотерми) бази даних при використанні різних методів розрахунку. Наведено переваги нового методу щодо розширення меж прогнозування та підвищення точності екстраполяції в порівнянні з відомими методами.

## Резюме

Представлен анализ результатов экстраполяции диаграмм длительной прочности жаропрочных сталей с помощью известных параметрических методов и модифицированного метода базовых диаграмм. Рассматриваются два варианта модели: если гипотеза “единой” кривой справедлива и если ее использование приводит к существенным погрешностям при прогнозировании длительных процессов деформирования. Продемонстрирована эффективность предложенных методик и отмечены их преимущества перед другими подходами.

1. *Работнов Ю. Н.* Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
2. *Локощенко А. М.* Моделирование процесса ползучести и длительной прочности металлов. – М.: МГИУ, 2007. – 264 с.
3. *Закономерности ползучести и длительной прочности.* Справочник / Под ред. С. А. Шестерикова. – М.: Машиностроение, 1983. – 101 с.
4. *Прочность материалов и конструкций* / Под ред. В. Т. Трощенко. – 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.
5. *Кривенюк В. В., Авраменко Д. С., Приходько Р. П.* Интерполяционный анализ особенностей длительного разрушения хромоникелевых и хромомолибденовых сталей // Пробл. прочности. – 2013. – № 2. – С. 91–96.
6. *Трунин И. И.* Механическое уравнение состояния металлических материалов и прогнозирование характеристик жаропрочности // Там же. – 1976. – № 9. – С. 9–14.
7. *Larson F. R. and Miller J.* A time-temperature relationship for rupture and creep stresses // Trans. ASME. – 1952. – **74**, No. 5. – P. 765–775.
8. *Orr R. L., Sherby O. D., and Dorn J. E.* Correlation of rupture data for metals at elevated temperatures // Trans. ASM. – 1954. – **46**. – P. 113–128.
9. *Manson S. S. and Haferd A. M.* A linear time-temperature relation for extrapolation of creep and stress rupture data // NASA TN 2890. – 1953. – 50 p.

10. Ковпак В. И. Прогнозирование жаропрочности металлических материалов. – Киев: Наук. думка, 1981. – 239 с.
11. Кучер Н. К., Приходько Р. П. Прогнозирование высокотемпературной длительной прочности материалов // Пробл. прочности. – 2013. – № 5. – С. 5–12.
12. Raut P. K. and Clough W. R. Computerized evaluations of the relative abilities of seven time-temperature parameters to correlate and extrapolate nickel alloy stress-rupture data // Trans. ASME, J. Basic Eng. – 1972. – 94. – P. 7–12.
13. Ромашов Р. В. Определение характеристик длительной прочности по результатам испытаний ограниченной длительности // Усп. современного естествознания. – 2006. – № 11. – С. 69–71.
14. Орлов А. И. Прикладная статистика. – М.: Экзамен, 2004. – 656 с.
15. Data sheets on the elevated-temperature properties of 18Cr–12Ni–Nb stainless steel tubes for boilers and heat exchangers (SUS 347H TB) // NRI Creep Data Sheet. – 2001. – No. 28. – P. 1–26.
16. Micrographs and microstructural characteristics of crept specimens of 18Cr–Ni stainless steel for boiler and heat exchanger seamless tubes (SUS 304H TB) // Ibid. – 1999. – No. M-1. – P. 1–76.
17. Data sheets on the elevated-temperature properties of 5Cr–0.5Mo steel tubes for boilers and heat exchangers (SNBA 25) // Ibid. – 1992. – No. 42. – P. 1–25.
18. 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.

Поступила 03. 06. 2015