

УДК 629.735.018.4:669.018.45:519.876.5(045)

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ХАРАКТЕРИСТИК ДОВГОТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ ЖАРОМІЦНИХ МАТЕРІАЛІВ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

*Кулик М. С., *Кучер О. Г., *Ковешніков М. О., **Дубровський С. С., *Петрук Я. А.

*Національний авіаційний університет

**Криворізький технічний університет

kms@nau.edu.ua

Запропоновано статистично оброблені та аналітично описані характеристики довготривалої міцності авіаційних жароміцних матеріалів EI437БВД, ЖС6К, ЖС6У, ЕП99 та X18H10T, які часто застосовуються для виготовлення деталей «гарячої частини» ГТД. Аналітично описані характеристики можуть бути використані для розрахункових методів оцінки довговічності деталей авіаційних двигунів та інших енергетичних установок, що працюють в умовах високих та повільно змінних температур, а також в умовах циклічних «запусків-зупинок». Перевага аналітичного опису характеристик полягає в можливості більш точної інтерполяції значень несучої спроможності жароміцних сплавів у разі проміжних значень температур.

Ключові слова: аналітична апроксимація, характеристики довготривалої міцності жароміцних сплавів, логарифмічно нормальна щільність розподілу довговічності, деталі «гарячої частини» ГТД.

The characteristics of the long-term strength of heat-resistant materials EI437BVD, ZS6K, ZS6U, EP99 and X18H10T are in the article. These characteristics are often used for manufacturing details of the "hot part" of gas turbine engines. Analytically described characteristics can be used for the calculation of estimation of durability of parts of aircraft engines and other power plants working in high and slowly varying temperature conditions, as well as in conditions of cyclic "starts and stops". The advantage of analytical description of the characteristics is the possibility of a more accurate interpolation of the load bearing capacity of heat-resistant alloys at intermediate values of temperatures.

Keywords: analytical approximation, the characteristics of the long-term strength of heat-resistant alloys, the log-normal distribution density of longevity, details of the "hot part" of GTE.

Постановка завдання

Під час розрахунків на довготривалу міцність деталей «гарячої частини», що працюють в умовах теплових змін, інколи не зручно використовувати довідникові дані характеристик довготривалої міцності, що представлені лінійними залежностями, довготривалої міцності від рівнів напруж при фіксованих рівнях температур. Тому основним завданням статті є аналітична апроксимація характеристик довготривалої міцності, що дасть змогу використовувати їх і для будь-яких проміжних та змінних температур та значно підвищить точність розрахунків на довговічність деталей «гарячої частини» ГТД.

Метод статистичної та аналітичної обробки характеристик довготривалої міцності матеріалів

Рівняння сімейства кривих тривалої міцності матеріалу для різних постійних температур можна отримати шляхом аналітичного опису відповідних експериментальних даних.

використання статистичних методів обробки. Для використання цих методів необхідно встановити закон розподілу довговічності матеріалу.

Відповідно до рекомендацій, наведених у працях [1–8], розподіл довговічності матеріалу при довготривалому статичному навантаженні доцільно описувати логарифмічно нормальним законом.

Логарифмічно нормальна щільність розподілу довговічності τ виражається таким співвідношенням:

$$\varphi(\tau) = \frac{1g e}{\tau \sqrt{2\pi D_{lq\tau}}} \exp \left[-\frac{(1g \tau - M_{1g \tau})^2}{2D_{lq\tau}} \right]. \quad (1)$$

Параметри цього розподілу залежать від рівня напружень.

© М.С. Кулик, О.Г. Кучер, М.О. Ковешніков, С.С. Дубровський, Я.А. Петрук, 2011

На рис. 1 наведено дані експериментальних досліджень довготривалої міцності сплаву EI437Б, запозичені з праць [1–6]. Як видно з цього рисунку результати експерименту мають істотний розкид, що приводить до необхідності

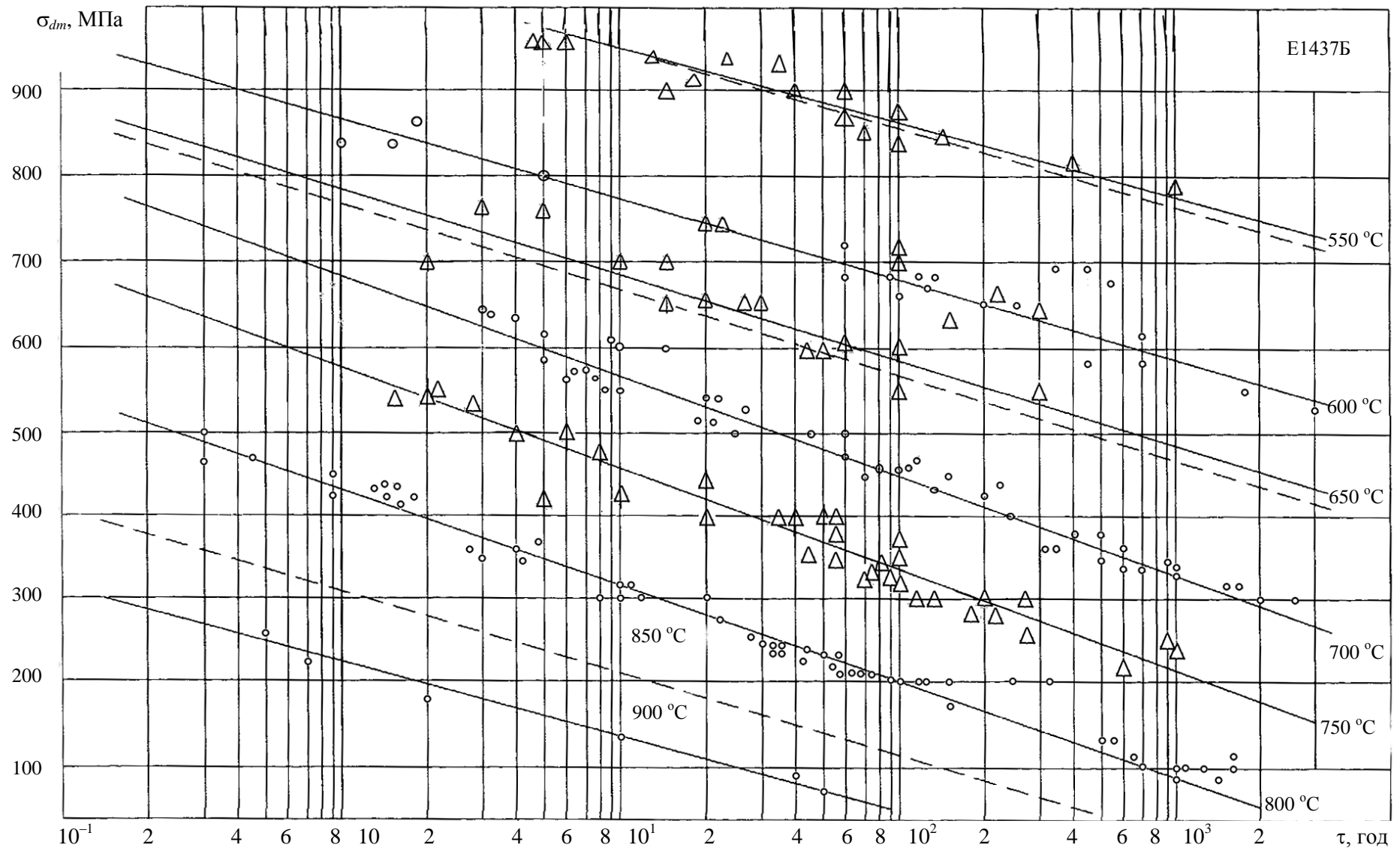


Рис. 1. Характеристики довготривалої міцності сплаву E1437B: дані для температур, °C:
 Δ — 550, 650, 750; \circ — 600, 700, 800, 900; ————— експериментальні залежності; — — — розрахункові залежності

Зокрема (рис. 1), математичне очікування логарифма довговічності можна вважати лінійною функцією напружень σ_{dm} :

$$M_{\lg \tau} = a(T) + b(T)\sigma_{dm}, \quad (2)$$

де $a(T)$, $b(T)$ — коефіцієнти, залежні від температури до i температури.

Дисперсію логарифма довговічності для даних, наведених на рис. 1, доцільно вважати незалежною від напруження, тобто вважати

$$D_{\lg \tau} = S^2 = \text{const}. \quad (3)$$

Об'єднуючи співвідношення (1) і (2), знаходимо

$$\varphi(\tau/\sigma_{dm}, a, b, S) = \frac{\lg e}{\tau S \sqrt{2\pi}} \times \exp\left[-\frac{(\lg \tau - a - b\sigma_{dm})^2}{2S^2}\right]. \quad (4)$$

Найефективнішим методом оцінювання параметрів a , b , S розподілу (4) є метод максимальної правдоподібності [7; 10; 11], який передбачає мінімізацію залежної від цих параметрів функції правдоподібності:

$$L = \prod_{i=1}^n \varphi_i(a, b, S) \rightarrow \min, \quad (5)$$

де n — число експериментальних значень довговічності матеріалу для деякої температури.

Вимога (5) еквівалентна

$$\frac{\partial \ln L}{\partial a} = \frac{\partial \ln L}{\partial b} = \frac{\partial \ln L}{\partial S} = 0, \quad (6)$$

системі рівнянь для визначення параметрів a , b , S .

Для розподілу (4) система (6) має вигляд:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lg \tau_i - na - b \sum_{i=1}^n (\sigma_{dm})_i = 0; \\ \sum_{i=1}^n (\sigma_{dm})_i \lg \tau_i - a \sum_{i=1}^n (\sigma_{dm})_i - b \sum_{i=1}^n (\sigma_{dm})_i^2 = 0; \\ \sum_{i=1}^n [\lg \tau_i - a - b(\sigma_{dm})_i]^2 - n S^2 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (7), дістаємо

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n (\sigma_{dm})_i \lg \tau_i - \sum_{i=1}^n (\sigma_{dm})_i \sum_{i=1}^n \lg \tau_i}{n \sum_{i=1}^n (\sigma_{dm})_i^2 - \left[\sum_{i=1}^n (\sigma_{dm})_i \right]^2}; \quad (8)$$

$$a = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \lg \tau_i - b \sum_{i=1}^n (\sigma_{dm})_i \right]; \quad (9)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\lg \tau_i - a - b(\sigma_{dm})_i]^2. \quad (10)$$

Обчислені за формулами (8)—(10) параметри з використанням даних рис. 1 розподілу (4) для

сплаву ЕІ437Б наведені на рис. 2 у вигляді відповідних температурних залежностей. Як випливає з рис. 1, середньоквадратичне відхилення логарифма довговічності S зі зміною температури не проявляє тенденцій до зміни, а, отже, цей параметр можна обрати постійним у розглянутому діапазоні температур і рівним $S \approx 0,2$. У температурних залежностях параметрів рівняння (2) a і b спостерігаються чіткі тенденції, причому ці залежності мають переломи в області температур 720—725 °С. Зазначені переломи відбивають різку зміну властивостей міцності матеріалу зумовлену фазовими перетвореннями.

З рис. 2 видно, що залежність коефіцієнта a від температури може бути апроксимована рівняннями двох відрізків прямих ліній. Проте, використовуючи властивість абсолютної величини, ці відрізки можна описати одним загальним рівнянням, що має вигляд (8)

$$a = 23,1815 - 0,02525T + |8,6915 - 0,01213S|. \quad (11)$$

Відповідно до цього рівняння на рис. 2 побудовані суцільні лінії для залежності $a(T)$.

Представлену на рис. 2 залежність $b(T)$ доцільно апроксимувати двома поліномами другого порядку або, використовуючи властивість абсолютної величини, одним рівнянням:

$$b = \left(383,473 - 1,338474T + 9,79304 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - \left| -5,49486 \cdot 10^{-4} T^2 - 0,392786T - 3,711 \right| \right) \cdot 10^{-4}. \quad (12)$$

Отримані співвідношення (11), (12) спільно з рівнянням (2) описують сімейство кривих тривалої міцності сплаву ЕІ437Б у діапазоні температур 550—900 °С. За допомогою вказаних співвідношень на рис. 1 побудовані розрахункові криві тривалої міцності, позначені пунктирними лініями для температур 550, 650 і 850 °С. Для решти значень температур розрахункові криві на рис. 1 співпали з експериментальними, що свідчить про достатньо високу точність запропонованої апроксимації.

У діапазоні температур 20÷550 °С залежності параметрів рівняння (2) від температури обрано для сплаву ЕІ437Б лінійними (рис. 3). Для цих залежностей отримані такі співвідношення:

$$\begin{cases} a = 71,2 - 0,11T; \\ b = -0,688 + 0,001036T. \end{cases} \quad (13)$$

Викладена методика побудови математичних моделей характеристик довготривалої міцності була використана в роботі для решти досліджуваних матеріалів: ЖС6К, ЖС6У, ЕП99вд, Х18Н10Т. Результати експериментальних досліджень тривалої міцності сплаву ЖС6К, зібрані за даними праць [6; 7; 12; 13], подано на рис. 4.

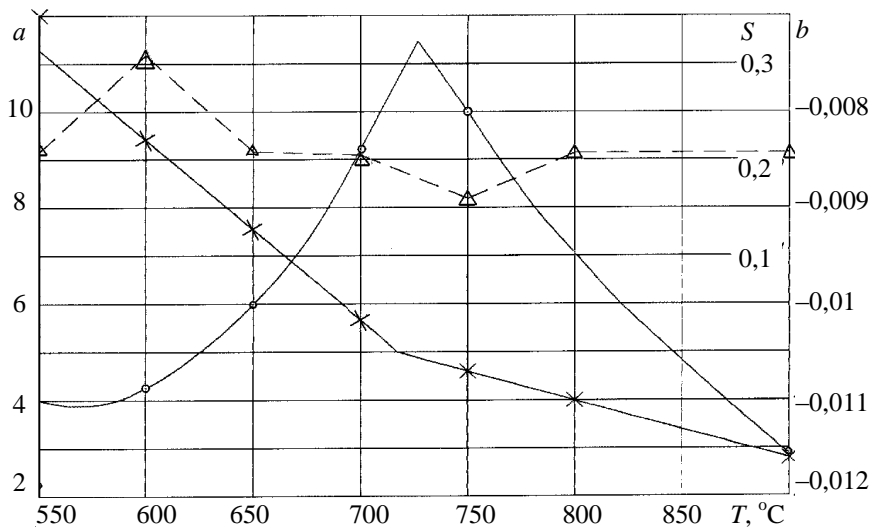


Рис. 2. Залежність параметрів розподілу для сплаву EI437Б від температури

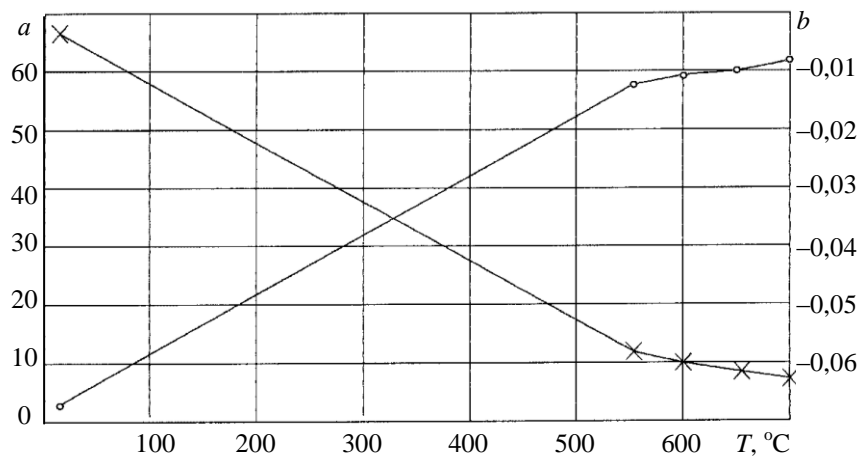


Рис. 3. Залежність параметрів рівняння кривих довготривалої міцності сплаву EI437Б від температури

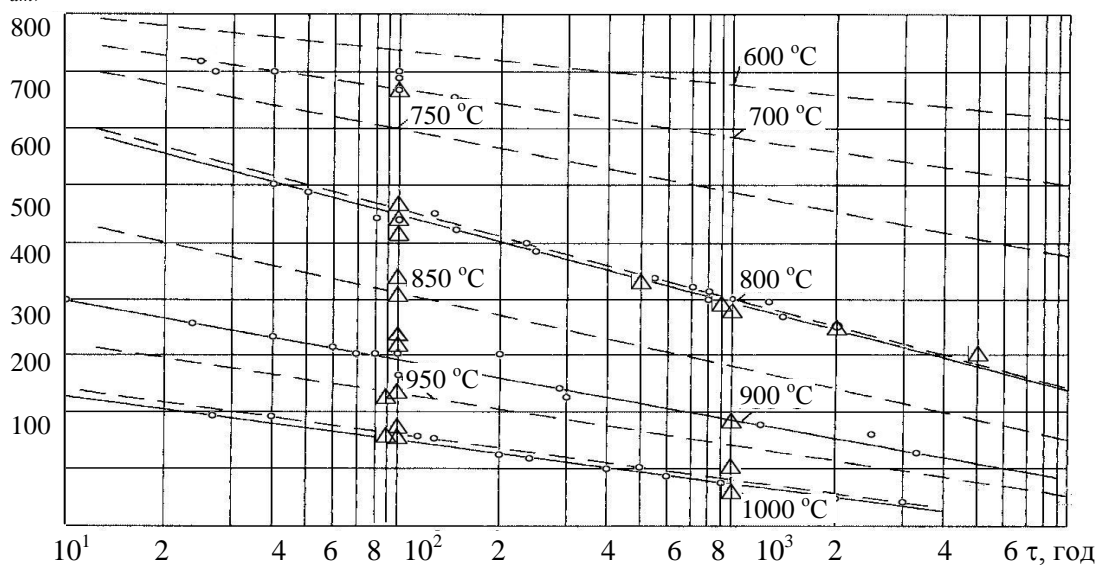
 σ_{dm} , МПа

Рис. 4. Характеристики довготривалої міцності сплаву ЗС6К; дані для температур, °С:

○ — взяті з праць [12; 13]; Δ — взяті з праць [6; 7];
 ————— експериментальні криві; - - - - розрахункові криві

Обчислені за цими даними параметри розподілу (4) позначені на рис. 5 точками на відповідних температурних залежностях. У результаті аналізу представлених графіків залежностей $a(T)$ і $b(T)$ апроксимовані лінійними рівняннями типу (11). Вказані рівняння наведені в таблиці, в якій також вказані межі для середньоквадратичного відхилення логарифма довговічності.

Експериментальні дані довготривалої міцності сплаву ЖС6У взяті з праці [14]. Ці дані наведено на рис. 6, і відповідні їм параметри розподілу (4) — на рис. 7. Апроксимуючі формули для залежностей $a(T)$ і $b(T)$, а також межі зміни параметра S зведені в таблицю.

На рис. 8 побудовані криві тривалої міцності сплаву ЕП99вд за даними праці [3]. Залежності

$a(T)$, $b(T)$ і $S(T)$ для цього сплаву зображені на рис. 9. Апроксимуючі функції для параметрів рівняння кривих довготривалої міцності (2) наведено також у таблиці.

Для неіржавіючої сталі Х18Н10Т (рис. 10) експериментальні дані з тривалої міцності запозичені з праці [3]. Температурні залежності параметрів рівняння (2) так, як і для попередніх матеріалів апроксимовані лінійними функціями (див. таблицю і рис. 11).

За допомогою наведених в таблиці рівнянь і співвідношення (2) на рис. 4, 6, 8, 10 побудовані розрахункові криві довготривалої міцності матеріалів, які добре узгоджуються з експериментальними даними.

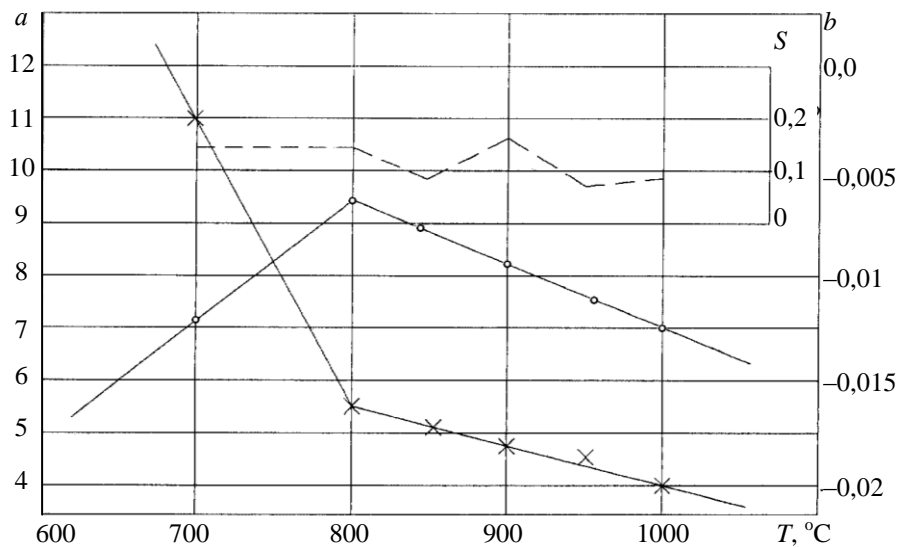


Рис. 5. Залежності параметрів розподілу для сплаву ЖС6К від температури

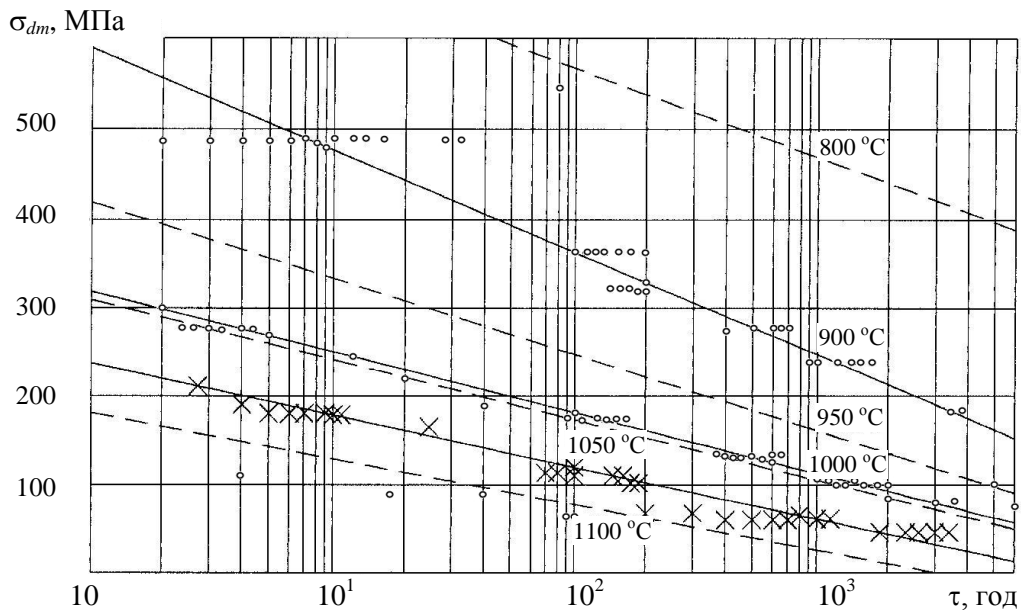


Рис. 6. Характеристики довготривалої міцності сплаву ЖС6У; дані для температур, °С: \circ — 800, 900, 1000, 1100; \times 1050; — — — експериментальні криві; - - - розрахункові криві

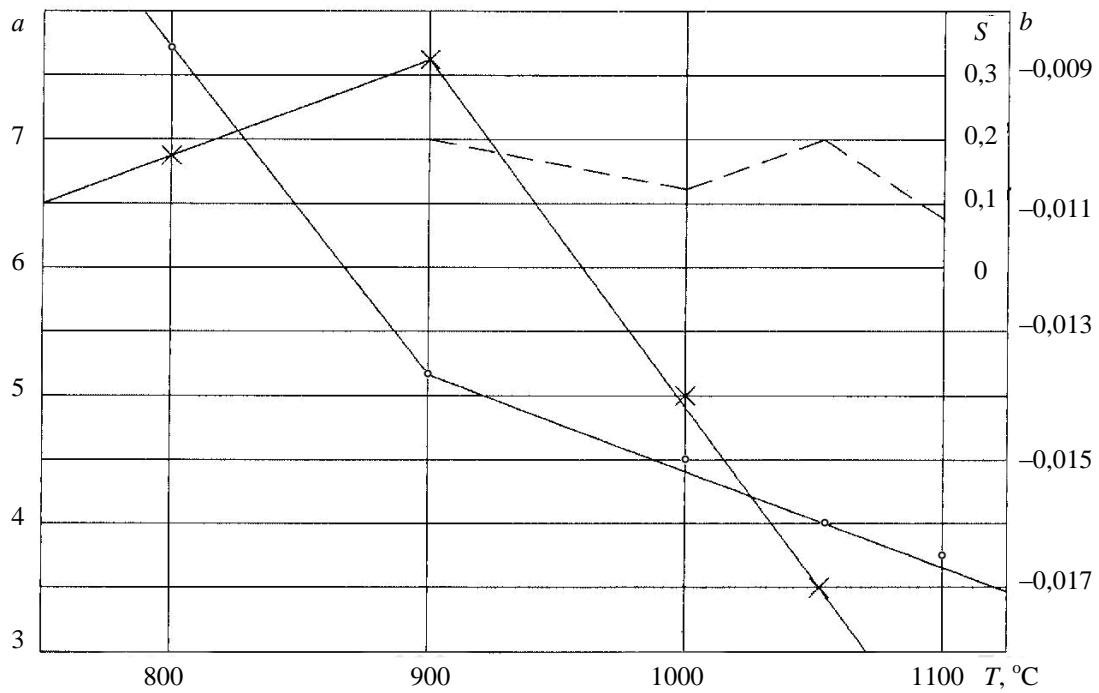


Рис. 7. Залежність параметрів розподілу для сплаву ЖС6У від температури

Таблиця

Апроксимуючі функції для параметрів рівняння кривих довготривалої міцності

Матеріал	Рівняння для параметрів a і b	S
ЕІ437БВД	$a = 71,2 - 0,1T$; $b = -0,688 + 0,001036T$ (при $T = 20-550$ °C); $a = 23,1815 - 0,025255 + 8,6915 - 0,012135T $ (при $T = 550-900$ °C); $b = \left(\begin{array}{l} 383,473 - 1,338474T + 9,79304 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - \\ - 5,49486 \cdot 10^{-4} T^2 - 0,392786T - 3,711 \end{array} \right) \cdot 10^{-4}$	0,15–0,3
ЖС6К	$a = 31,03602 - 0,0319973T - 19,70507 - 0,0246871T $; $b = (0,0123598T - 16,0853 - 0,0433511T - 34,6767) \cdot 10^{-3}$ (при $T = 600-1000$ °C)	0,075–0,15
ЖС6У	$a = 20,12495 - 0,016589T - 7,86305 - 0,0087368T $; $b = (9,7805 - 0,0205985T - 0,0351485T - 31,6335) \cdot 10^{-3}$ (при $T = 800-1100$ °C)	0,1–0,2
ЕП99вд	$a = 30,0697 - 29,4057 \cdot 10^{-3}T - 4,5412 \cdot 10^{-3}T - 4,0871 $; $b = - \left(10,4385 \div 3,19 \cdot 10^{-3}T - 8,2843 \cdot 10^{-3}T - 7,45585 \right) \cdot 10^{-3}$ (при $T = 700-1000$ °C)	0,2–0,25
Х18Н10Т	$a = 38,1925 - 0,0564443T - 22,0271 - 0,0402606T $; $b = (0,0975971T - 69,3924 - 0,129843T - 71,4136) \cdot 10^{-3}$ (при $T = 500-900$ °C)	0,12÷0,24

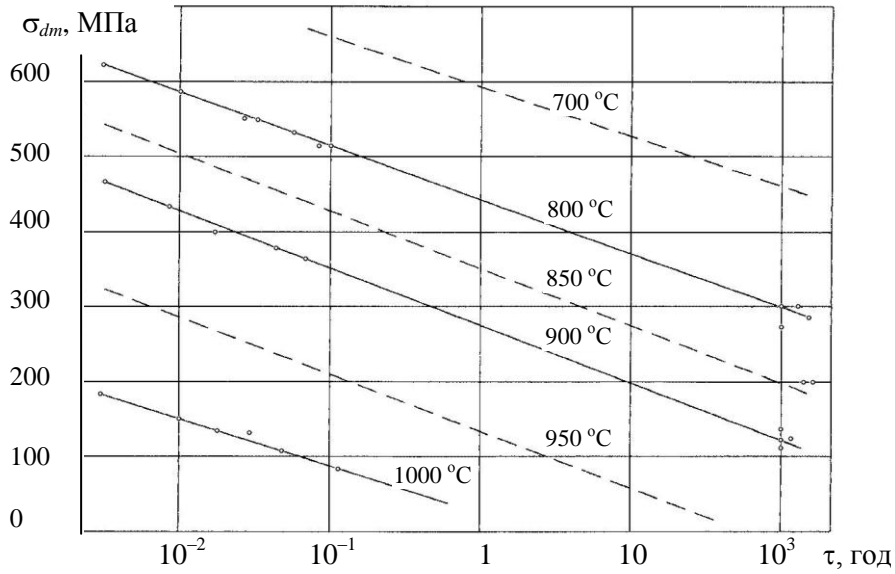


Рис. 8. Характеристики довготривалої міцності сплаву EP99VD:
 ————— експериментальні криві; — — — розрахункові криві

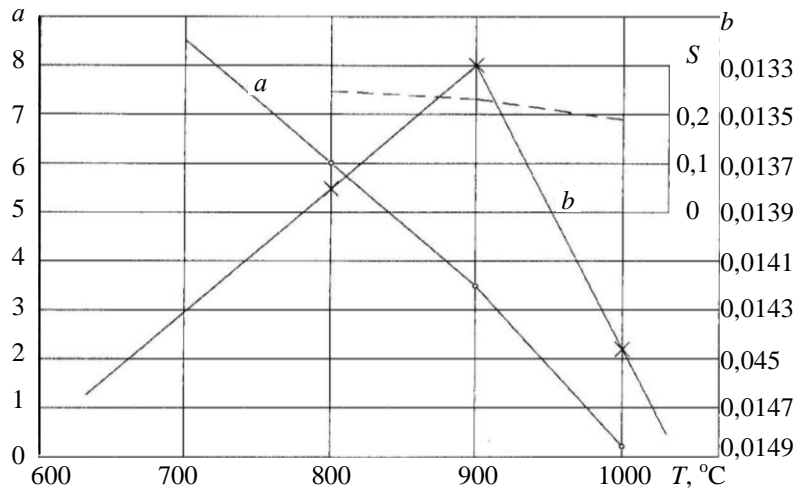


Рис. 9. Залежність параметрів розподілу для сплаву EP99VD температури

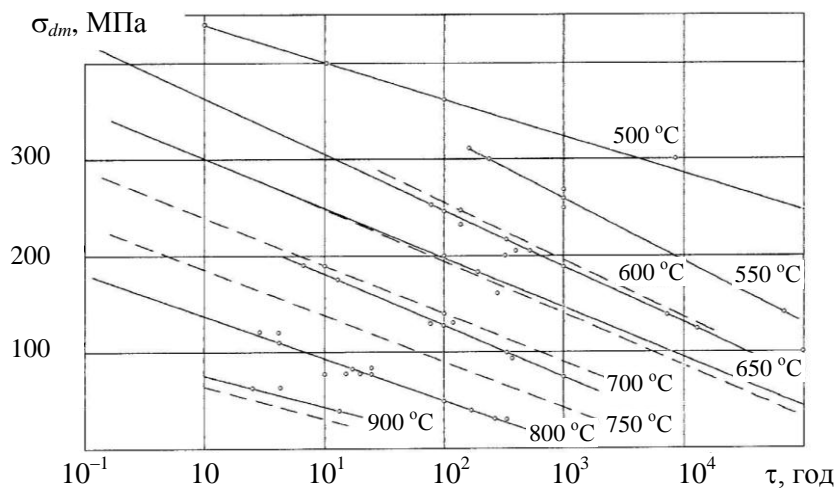


Рис. 10. Характеристики довготривалої міцності сплаву X18N10T:
 ————— експериментальні криві; — — — розрахункові криві

Висновки:

1. Отримані рівняння сімейств кривих довготривалої міцності можуть бути використані для реалізації запропонованого в статті [15] методу розрахунку термоциклічної довговічності матеріалів гіпотезою лінійного підсумування пошкоджень [12] для наближеної оцінки ресурсу деталей «гарячої частини» авіаційних ГТД.

2. Отримані рівняння та екстраполяція характеристик довготривалої міцності можуть бути використані для точної оцінки довговічності деталей «гарячої частини» ГТУ, що працюють на стаціонарних чи квазістаціонарних режимах у більш широкому діапазоні робочих температур.

3. Викладений метод аналітичної апроксимації характеристик довготривалої міцності може бути використаний також для опису новітніх жароміцних матеріалів.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Справочник по авиационным материалам*. — М.: Машиностроение, 1965. — 632 с.
2. *Химушин Ф.Ф.* Жаропрочные стали и сплавы / Ф. Ф. Химушин. — 2-е изд. — М.: Металлургия, 1969. — 752 с.
3. *Дульнев Р.А.* Термическая усталость материалов / Р. А. Дульнев. — М.: Машиностроение, 1971. — 63 с.
4. *Справочник по авиационным материалам и технологии их применения*. — М.: Транспорт, 1979. — 242 с.
5. *Веронский А. И.* Термическая усталость материалов / А. И. Веронский. — М.: Машиностроение, 1986. — 129 с.
6. *Арзамасов Б. Н.* Конструкционные материалы / Б. Н. Арзамасов, В. А. Брострем, Н. А. Буше [и др.]; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. — М.: Машиностроение, 1990. — 688 с.
7. *Адамович В. К.* Сопоставление методов экстраполяции длительной прочности / В. К. Адамович, Я.Ф. Фридман, М. Б. Ревзюк, А. В. Станюкович. — К.: Пробл. прочности, 1975. — № 11. — С. 26.—29.
8. *Усталость жаропрочных сплавов и рабочих лопаток ГТД* / Б. А. Грязнов, С. С. Городецкий, Ю. С. Налимов [и др.]. — К.: Наук. думка, 1992. — 264 с.
9. *Дубровский С.С.* Модель долговечности жаропрочных материалов ГТД / С. С. Дубровский // Вестник Днепропетровского национального университета им. О. Гончара. — 2008, № 6. — С. 39—61.
10. *Фридман Я. Ф.* Экстраполяция длительной прочности методом максимума правдоподобия / Я. Ф. Фридман. — Рига: РКИИГА, 1975. — С. 50—70.
11. *Некоторые способы температурно-временной аппроксимации семейства кривых длительной прочности жаропрочных сплавов* / М. М. Осинцев, А. Г. Кучер, Н. А. Ковешников [и др.] // Межвуз. сб. науч. труд. — К.: КИИГА, 1979. — С. 134—140.
12. *Ножницкий Ю.А.* Обеспечение прочностной надежности рабочих лопаток высокотемпературных турбин / под ред. Ю. А. Ножницкого, Р. И. Ткаченко // Новые технологические процессы и надежность ГТД. — М.: ЦИАМ, 2008. — Вып. 7. — 172 с.
13. *Несущая способность лопаток газовых турбин при нестационарном тепловом и силовом воздействии* / Г. Н. Третьяченко, Л. В. Кравчук, Р. Н. Куриат [и др.]. — К.: Наук. думка, 1975. — 295 с.
14. *Статистический анализ и прогнозирование характеристик жаропрочности литейных сплавов ГТД* / И. П. Бульгин, Л. Н. Тимофеев, Е. Р. Голубовский [и др.]. — К.: Пробл. прочности, 1977. — № 11. — С. 57—62.
15. *Кулик М. С.* Оцінка термоциклічної довговічності жароміцних матеріалів гіпотезою лінійного підсумування пошкоджень / М. С. Кулик, О. Г. Кучер, М. О. Ковешніков [та ін.] // Наукоємні технології. — К.: НАУ-друк, 2010, № 2. — С. 5—14.

Стаття надійшла до редакції 20.01.2011.