



## ПРИХОДЬКО

**Руслан Павлович** –

кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник  
відділу повзучості і тривалої  
міцності Інституту проблем  
міцності ім. Г.С. Писаренка  
НАН України

## ПРОГНОЗУВАННЯ ТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОВЗУЧОСТІ ЖАРОМІЦНИХ МАТЕРІАЛІВ

**За матеріалами наукового повідомлення  
на засіданні Президії НАН України  
21 грудня 2016 року**

*Розроблено новий метод прогнозування тривалої міцності матеріалів, що ґрунтується на концепції базових діаграм. Запропоновано прості співвідношення, що пов'язують розрахункову довговічність і відповідне їй діюче напруження, визначене за базовою діаграмою. 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 переваги запропонованого підходу порівняно з найпоширенішими параметричними методами Ларсона–Міллера, Орра–Шербі–Дорна, Менсона–Саккопа, Труїна та ін.*

**Ключові слова:** повзучість, діаграми тривалої міцності, параметричні методи, конкретизація визначальних співвідношень.

У повсякденному житті ми щодня користуємося величезною кількістю технологічних розробок, які з року в рік стають усе більш досконалішими і значно розширюють наші можливості. Сьогодні ми маємо змогу переміщуватися з великою швидкістю на літаках, автомобілях, кораблях, досліджувати глибини океанів, вивчати близький і далекий космос. Для досягнення своїх цілей ми використовуємо найрізноманітніші прилади і устаткування. Значна частина елементів, з яких складаються сучасні машини і механізми, перебуває під дією тривалого навантаження в умовах високих температур. Наприклад, це деталі парових і газових турбін, реактивних двигунів, технологічних установок з перегонки нафти і газу тощо. Для прогнозування залишкового ресурсу та несівної здатності елементів таких відповідальних конструкцій потрібні ефективні методи, які б враховували наявність деформацій повзучості та зміну механічних характеристик матеріалу в процесі його експлуатації. Тому проблемі прогнозування довговічності матеріалу присвячено

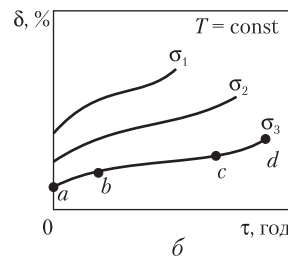
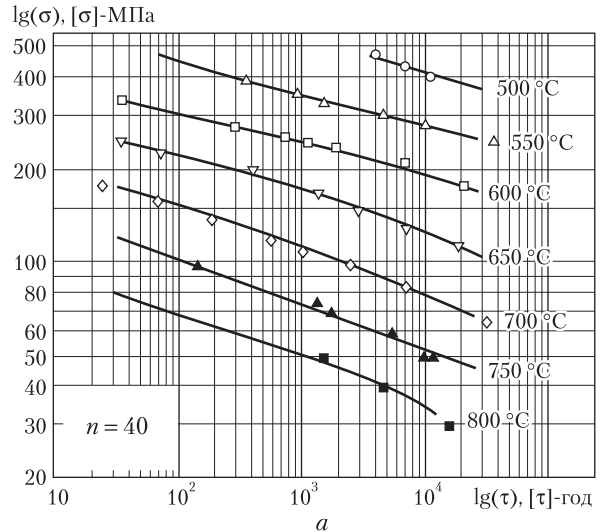
велику кількість робіт. Зокрема, слід відзначити внесок таких науковців, як Ю.М. Работнов, І.І. Трунін, Ф. Ларсон, Дж. Міллер, Р. Орт, О. Шербі, Дж. Дорн та ін. [1–4]. Кожна із запропонованих ними моделей дає задовільну достовірну інформацію у визначених інтервалах використання, проте кожна з них має і певні обмеження.

При оцінюванні залишкового ресурсу елементів конструкцій за основу розрахунків беруть експериментальні дані з тривалої міцності та повзучості досліджуваного сплаву, які отримують при проведенні досліджень на зразках-свідках.

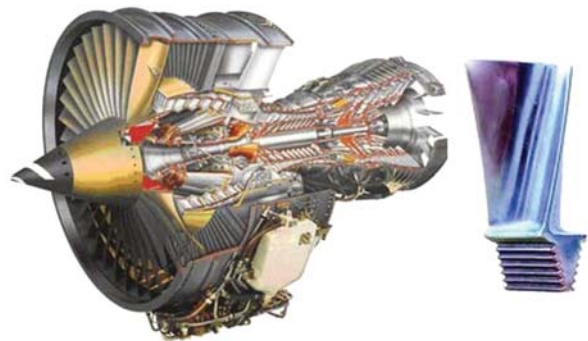
На рис. 1 наведено загальний вигляд діаграм тривалої міцності та кривих повзучості [5]. Можна бачити, що кожна діаграма змінює свій нахил і кривизну залежно від напруження і температури, що свідчить про різний характер поведінки матеріалу за різних умов експлуатації. Тому чим більшу експериментальну базу даних ми маємо, тим точніший результат екстраполяції отримаємо. Сьогодні надзвичайно гостро стоїть проблема обґрунтованого подовження ресурсу з гарантованою функціональною придатністю елементів конструкцій теплоенергетики до 300 тис. годин і більше, виходячи з експериментальних даних обмеженого терміну дослідження. У зв'язку з цим вивчення процесів повзучості і тривалої міцності складнолегованих жароміцних сплавів та розроблення ефективних методів прогнозування процесів повзучості і тривалої міцності є актуальним завданням інженерної практики, яке має велике наукове і прикладне значення.

Головною метою нашої роботи було встановлення закономірностей статичного тривалого деформування і міцності жароміцних сплавів та розроблення моделей прогнозування залишкового ресурсу відповідальних елементів конструкцій. Предметом дослідження були зразки з лопаток газових турбін (рис. 2).

Що стосується досліджуваних лопаток газових турбін, то одним з основних видів пошкодження таких відповідальних елементів конструкцій є необоротні процеси деформування: під час тривалої експлуатації на кінцях



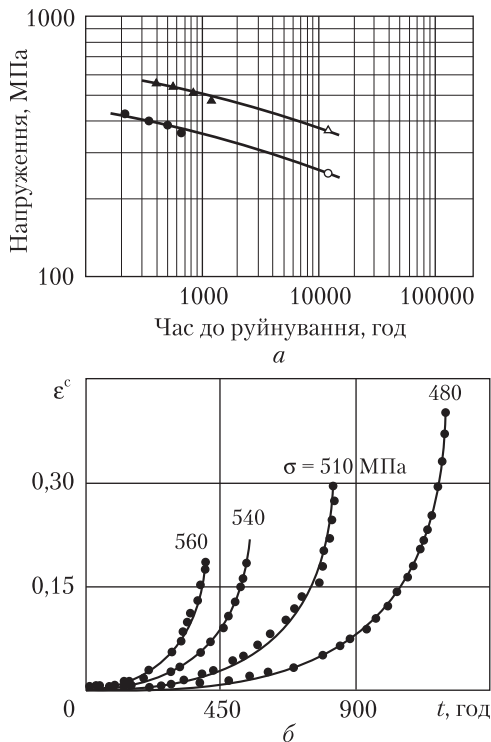
**Рис. 1.** Загальний вигляд діаграм тривалої міцності (а) та кривих повзучості (б)



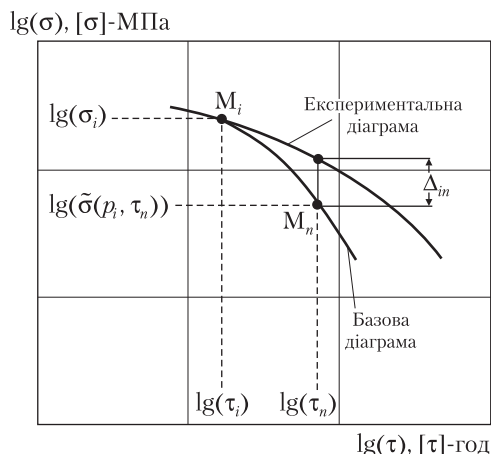
**Рис. 2.** Відповідальні елементи конструкцій (лопатки газових турбін), що досліджувалися в цій роботі

лопаток під дією відцентрової сили виникають статичні напруження, що спричинюють процеси повзучості і врешті-решт призводять до руйнування. Такі відмови загрожують життю людей, що є неприпустимим.

У пропонуваній роботі було вирішено такі завдання:



**Рис. 3.** Результати експериментальних досліджень сплаву ВЖ-1: *a* – криві тривалої міцності; *б* – криві повзучості за температури 850 °С



**Рис. 4.** Графічна інтерпретація визначення розрахункових параметрів ММБД

- експериментально досліджено процеси повзучості і тривалої міцності жароміцних сплавів у широкому діапазоні температур [6];

- розроблено новий метод прогнозування тривалої міцності на основі методу базових діаграм Кривенюка [5];

- досліджено ефективність запропонованої методики порівняно з найбільш використовуваними в інженерній практиці підходами;

- проаналізовано достовірність запропонованої методики на основі експериментальних баз даних різних матеріалів.

Для вирішення поставлених завдань у нашій лабораторії відділу повзучості і тривалої міцності Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України на випробувальних машинах типу АІМА 5-1(2) впродовж 1,5 року тривало експериментальне дослідження. Після його завершення було проаналізовано отримані результати (рис. 3). Як бачимо, криві тривалої міцності не мають різких перегинів, що свідчить про однотипність процесів деформування. З наведених кривих повзучості можна зробити висновок про монотонність зміни процесів деформування від діючих напружень.

Отже, на основі отриманих нами експериментальних результатів, а також інших доступних експериментальних даних запропоновано нову методику прогнозування тривалої міцності, підґрунтям для розроблення якої став метод базових діаграм Кривенюка [5]. Основою підходу, запропонованого В.В. Кривенюком, є врахування відхилень експериментальних кривих від так званих базових діаграм та їх статистична обробка, яка і є основним недоліком цього методу. На рис. 4 наведено графічну інтерпретацію визначення головних розрахункових параметрів модифікованого методу базових діаграм (ММБД).

Алгоритм розрахунку за запропонованим підходом представлено такими математичними залежностями:

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

де  $p_i$  – параметр, що залежить від координат точки, з якої здійснюється прогнозування;  $\Delta_{in} = \lg(\sigma_n) - \lg(\tilde{\sigma}(p_i, \tau_n))$  – функція нев’язки – величина, яка визначає різницю між напруженням, виходячи з базової діаграми при прогнозуванні довговічності, й дійсним значен-

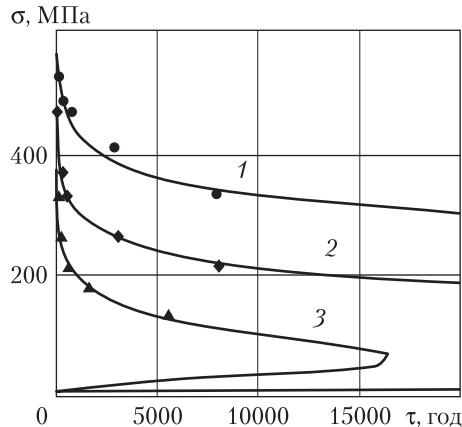


Рис. 5. Опис діаграм тривалої міцності за методом Ларсона–Міллера [2]: 1 – 600 °С; 2 – 650 °С; 3 – 700 °С

ням напруження;  $\beta_{in} = \frac{\lg(\sigma_i) - \lg(\tilde{\sigma}(p_i, \tau_n))}{\lg(\tau_i) - \lg(\tau_n)}$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$  – параметр, що визначає котангенс кута нахилу до осі ординат відрізка діаграми тривалої міцності;  $\Delta = \Delta(\beta)$ .

При прогнозуванні за ММБД  $\Delta_{in}$  і  $\beta_{in}$  – дві нові величини. Слід зазначити, що при такому підході діє гіпотеза об'єднаної кривої широкочасних параметричних методів.

Для порівняльного аналізу було використано лінійні моделі параметричних співвідношень екстраполяції діаграм тривалої міцності Ларсона–Міллера [2], Орра–Шербі–Дорна [3], Менсона–Хеферда [4], Труніна [1]. Зауважимо, що основою перелічених методів є зведення сімейства кривих тривалої міцності в одну усереднену. До недоліків розглянутих підходів можна віднести малу екстраполяційну базу і неможливість прогнозування в разі малої експериментальної вибірки. Доказом цього є дані, наведені на рис. 5 і в табл. 1. Як бачимо, в таблиці відсутні деякі результати прогнозування тривалої міцності, що легко пояснити, проаналізувавши кривизну залежності (рис. 5), – за температури 700 °С зазначений метод не може дати задовільного прогнозу більше, ніж на 15 тис. год, оскільки при цій температурі різко змінюється кривизна функції [5].

Таблиця 1. Обмеження екстраполяції діаграм тривалої міцності сталі 15Cr-26Ni-1,3Mo-2,1Ti-0,3V

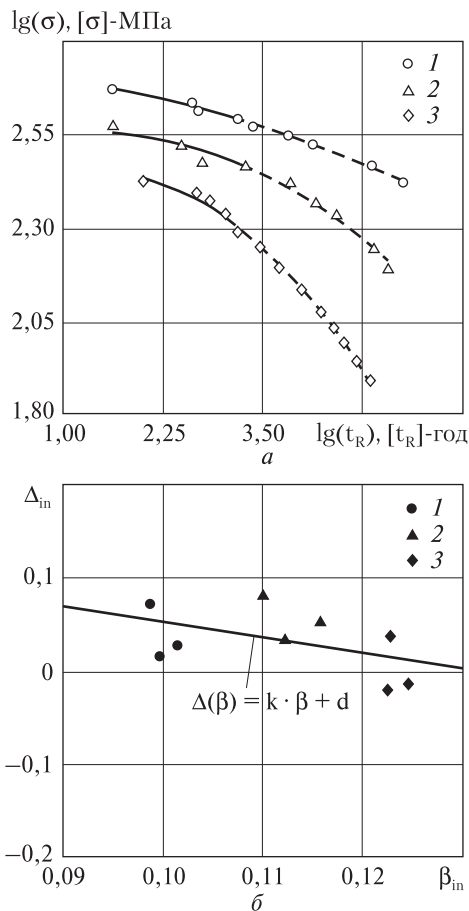
Дані за різними методами, МПа	Температура, °С		
	600	650	700
Експериментальні значення	235	137	98
Метод Ларсона–Міллера	251	134	–
Метод Орра–Шербі–Дорна	250	125	–
Метод Менсона–Саккопа	248	134	–
Метод Конрада	242	116	54
Метод Корчинського–Клаусса	272	160	104
Метод Труніна	253	137	81

Таблиця 2. Результати порівняльного аналізу екстраполяції тривалої міцності сталі 21Cr-32Ni-Ti-Al

Дані за різними методами, МПа	Температура, °С	
	600	650
Експериментальні значення	157	98
Метод ММБД	162,0	95,4
Метод МБД	163,1	94,5
Метод Ларсона–Міллера	151,1	103,0
Метод Орра–Шербі–Дорна	147,7	100,2
Метод Менсона–Саккопа	146,8	102,3
Метод Конрада	138,7	89,3
Метод Корчинського–Клаусса	152,8	104,2
Метод Труніна	150,2	101,7

Таблиця 3. Результати порівняльного аналізу екстраполяції тривалої міцності сталі 18Cr-12Ni-Mo

Дані за різними методами, МПа	Температура, °С				
	550	600	650	700	750
Експериментальні значення	196	108	83	41	37
Метод ММБД	197,0	124,6	80,4	40,8	38,9
Метод Ларсона–Міллера	198,2	127,5	90,0	48,2	38,8
Метод Орра–Шербі–Дорна	200,0	124,6	86,1	39,4	30,7
Метод Менсона–Саккопа	185,3	122,5	89,5	49,2	40,1
Метод Конрада	202,0	115,4	72,8	12,3	11,2
Метод Корчинського–Клаусса	207,5	126,7	88,1	48,8	40,4
Метод Труніна	201,1	124,8	86,2	45,5	38,8



**Рис. 6.** Графічна інтерпретація алгоритму ММБД: *a* – діаграми тривалої міцності сталі 2,25Сг-1Мо за різних фіксованих температур: 1 – 450 °С, 2 – 500 °С, 3 – 550 °С; *b* – визначення виду функції нев'язки для всіх ізотерм: 1 – 450 °С, 2 – 500 °С, 3 – 550 °С

Для підтвердження адекватності нашої моделі в табл. 2 і 3 наведено результати порівняльного аналізу екстраполяції довговічності різних матеріалів відповідно до описаних вище підходів.

На рис. 6 у графічному вигляді представлено алгоритм розрахунку за запропонова-

ним методом. Суцільними лініями позначено відому область експериментальних даних, що вважалася основою для прогнозування, штрих-пунктирна лінія – прогнозована область (рис. 6*a*). На рис. 6*b* зображено графічну залежність – апроксимація функції нев'язки, відповідно до якої розраховується шукане напруження. У цьому випадку було обрано найпростішу лінійну залежність.

Наведені розрахункові значення тривалої міцності підтверджують ефективність запропонованого модифікованого методу базових діаграм. Слід зазначити, що чим більшим був порядок прогнозування, тим точніші результати екстраполяції ми отримали порівняно з широким живаними на сьогодні параметричними підходами.

Отже, нами було досліджено закономірності тривалого деформування трьох жароміцних сплавів у широкому діапазоні температур. На основі отриманих експериментальних даних та з використанням аналогічних результатів інших авторів, запропоновано новий модифікований метод базових діаграм, який дозволяє істотно розширити межі екстраполяції процесів тривалого деформування. Продемонстровано переваги такого підходу порівняно з відомими параметричними методами (Ларсона–Міллера, Орра–Шербі–Дорна, Менсона–Хеферда, Труніна, МБД та ін.).

Результати обговорюваної роботи було апробовано в розрахунковій практиці на АТ «Мотор-Січ».

*Доповідач висловлює глибоку подяку за допомогу в роботі й аналізі отриманих результатів співробітникам відділу повзучості і тривалої міцності Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка та особисто його керівнику доктору технічних наук М.К. Кучеру.*

## REFERENCES

1. Trunin I.I. A mechanical equation of the condition of metal materials and prediction of high-temperature strength characteristics. *Strength Mater.* 1976. **6**(9): 1013.  
[Трунин И.И. Механическое уравнение состояния металлических материалов и прогнозирование характеристик жаропрочности. *Проблемы прочности.* 1976. № 9. С. 9–13.]
2. Larson F.R., Miller J. Time temperature relationship for rupture and creep stresses. *Trans. ASME.* 1952. **74**(5): 765.
3. Orr R.L., Sherby O.D., Dorn J.E. Correlation of rupture data for metals at elevated temperatures. *Trans. ASM.* 1954. **46**: 113.
4. Manson S.S., Haferd A.M. A linear time-temperature relation for extrapolation of creep and stress rupture data. *NACA Technical Note 2890.* 1953.
5. Krivenyuk V.V. *Prediction of high-temperature creep and rupture strength.* Series: Materials and constructions strength. Vol. 5. (Kyiv, 2012). [in Russian].  
[Кривенюк В.В. *Прогнозирование высокотемпературной ползучести и длительной прочности.* Сер. Прочность материалов и конструкций. Т. 5. К.: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2012.]
6. Kucher N.K., Prykhod'ko R.P., Borovik O.V. Prediction of creep and long-term strength of materials under anisothermic deformation. *Strength Mater.* 2013. **45**(1): 93.  
[Кучер Н.К., Приходько Р.П., Боровик О.В. Прогнозирование ползучести и длительной прочности материалов при неизотермических процессах деформирования. *Проблемы прочности.* 2013. № 1. С. 128–139.]
7. Romashov R.V. Materials long-term strength characterization on the results of limited duration tests. *Advances in current natural sciences.* 2006. (11): 69. [in Russian].  
[Ромашов Р.В. Определение характеристик длительной прочности материалов по результатам испытаний ограниченной длительности. *Успехи современного естествознания.* 2006. № 11. С. 69–71.]

R.P. Prykhodko

Pisarenko Institute for Problems of Strength of National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

PREDICTION OF THE STRESS-RUPTURE STRENGTH AND MODELLING  
OF THE CREEP PROCESSES OF HIGH-TEMPERATURE CREEP-RESISTANT MATERIALS

A method to predict the stress-rupture strength of materials using the master-curve concept is presented. Simple formulas relating the theoretical lifetime and the corresponding stress determined from the master curve are proposed. To improve master-function calculations, an assumption is made on linear dependence on 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 linear function are assumed invariant to the test temperature. The method is capable of extrapolating, with accuracy sufficient for practical purposes, the lifetime to values that are more than two orders of magnitude greater than the available experimental data. The efficiency of the method is illustrated by calculating the lifetime of steels SUS 316-HP (18Cr–12Ni–Mo), and JIS SCMV 4NT (2.25Cr–1Mo) for quite wide ranges of stress and temperature. 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, Korshynsky–Clauss, and Trunin's.

**Keywords:** creep, parametric methods, specification of constitutive equations.