

УДК 621.438.083

- Беліков С. Б. д-р техн. наук, професор, професор кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: belikov@zpu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9510-8190
- Вініченко В. С. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: valeryi_v@ukr.net, ORCID: 0009-0001-7631-9822
- Засовенко А. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри математики Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: zasov77@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1012-6742
- Михайлов Ю. С. аспірант кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: uramix82@gmail.com, ORCID: 0009-0006-4930-228X
- Михайлов О. С. аспірант кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: asmykhaylov@gmail.com, ORCID: 0009-0001-2471-015X
- Макаров І. С. аспірант кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: rogivorakam@gmail.com, ORCID: 0009-0004-0054-3600
- Шмирко В. І. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри охорони праці і навколишнього середовища Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: vera.ivanovna1968@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1489-0166

ОЦІНКА КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ БЕЗПЕКИ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОВИХ ТУРБІН

Мета роботи. Визначення можливості застосування температурно-часових параметричних залежностей Міллера-Ларсона, Менсона-Хаферда, Шербі-Дорна для тривалого прогнозування характеристик міцності деталей, що зазнають окислювального і високотемпературного сульфідно-окислювального впливу.

Методи дослідження. Дослідження тривалої міцності проводили на зразках із сплаву ВЖЛ-12У та ЗМІ-3У в синтетичній золі (66,2 % Na_2SO_4 , 20,4 % Fe_2O_3 , 8,3 % NiO , 3,3% CaO , 1,8 % V_2O_5) та окисному середовищі при температурі 800 °С, 850 °С. Для прогнозу межі міцності матеріалів в окисному та корозійному середовищі було застосовано температурно-часові параметричні залежності Міллера-Ларсона, Менсона-Хаферда, Шербі-Дорна. Мікроструктуру зразків досліджували з використанням оптичного мікроскопу МІМ-8М

Отримані результати. Отримані результати свідчать про високий рівень корозійної стійкості зразків марки ЗМІ-3У при температурі 800 °С, 850 °С та можливість розрахунковим методом визначити границю міцності матеріалу на термін 1000, 5000 та 10000годин.

Проведені випробування зразків сплаву ВЖЛ-12У в синтетичній золі показали розбіжність експериментального часу до руйнування зразків і розрахункового значення незалежно від параметричного методу, що вказує на безпосередню залежність тривалої міцності від ступеня корозійної пошкоджуваності поверхні зразків.

Наукова новизна. Підтверджена можливість застосування температурно-часових параметричних залежностей Міллера-Ларсона, Менсона-Хаферда, Шербі-Дорна для тривалого прогнозування характеристик міцності деталей в окислювальному середовищі. В умовах сульфідно-окисного середовища застосування параметричних методів для визначення характеристик міцності на термін до 10000 годин можливе лише для корозійностійких сплавів. Інтенсивне корозійне пошкодження сплаву ВЖЛ12-У призводить до прискореної деформації, обмежує застосування температурно-часових залежностей для ефективного прогнозування часу руйнування деталей із даного матеріалу.

Практична цінність. Визначення достовірного методу прогнозування характеристик міцності жароміцних сплавів в окисному та корозійному середовищі дозволяє знизити часові і фінансові витрати на проведення тривалих натурних досліджень.

Ключові слова: жароміцні сплави, температурно-часові залежності, окисне середовище, сульфідно-окисна корозія, прогнозування.

Вступ

Глибока економічна криза, що спостерігається останнім часом не тільки в Україні, але і в інших країнах світу, стала причиною жорсткої економії майже у всіх напрямках розвитку виробництва. В різних галузях промисловості триває активний пошук механізмів зменшення собівартості продукції. В деяких галузях це досягається за рахунок скорочення номенклатури продукції, що випускається, в інших-виникає ідея економії на умовах праці робітників, їх рівня кваліфікаційної підготовки, на скороченні заходів по профілактиці травматизму та охороні здоров'я працюючих.

Найбільш складна ситуація, останнім часом, має місце в газотранспортній та газоперекачувальній системах нашої держави. Це пов'язано не тільки з умовами експлуатації наземних газотурбінних установок, а і значним терміном їх роботи (з кінця минулого століття). Тому, питання забезпечення безпеки, прогнозування ресурсу основних деталей та збільшення терміну безаварійної роботи обладнання стає все більш актуальним.

Аналіз досліджень та публікацій

Безпека газотурбінного двигуна багато в чому визначається довговічністю і надійністю робочих лопаток першого ступеня, що працюють в умовах високих температур, статичних і динамічних навантажень, під агресивним впливом продуктів згорання палива (газу), що містить сірку, натрій, хлор і інші домішки. Останні, при температурах експлуатації понад 800 °С, сприяють інтенсивним процесам високотемпературної корозії, що вимагає більш часті заміни лопаток [1–3].

Як свідчать дослідження [4], в процесі експлуатації робочих лопаток відбувається постійний комбінований вплив розтягуючих (відцентрових сил), динамічних та статичних вібраційних навантажень. Сумарні (еквівалентні) навантаження в лопатках 1-ї ступені становлять близько 120 МПа. Крім того, по висоті профілю робочої лопатки навантаження також розподіляються нерівномірно з максимальними еквівалентними значеннями в середньому перетині, по висоті та перетину має місце градієнт температур.

Такі умови експлуатації визначають комплекс вимог до матеріалів, що призначені для виготовлення лопаток газотурбінних установок (ГТУ). Необхідними є високі характеристики короткочасної та тривалої міцності, пластичності, втоми та термічної втоми, корозійної стійкості, стабільності структури та властивостей впродовж всього терміну роботи. Економічно обґрунтованою є вимога до можливості багатократного відновлення структури та властивостей [3].

Зазначеним вимогам відповідають сплави на нікелевій основі двох типів легування: перший – такий, що має вміст хрому до 10 % при відношенні $Ti/Al < 1$; другий – з більшим значенням хрому (12–14 %) та відношенням титану до алюмінію більше одиниці. [5]

До першої групи належить сплав марки ВЖЛ-12У (Cr – 8–10 %, Co – 9,2 %, Mo – 3 %, W – 1,4%, Ti – 4,4 %, Al – 5,3 %). Завдяки підвищеному вмісту

вольфраму і молібдену, ВЖЛ-12У має високі характеристики жароміцності і циклічної жаростійкості, але у середовищі згорання низькосортних палив, що містять сірку і ванадій, схильний до корозійного пошкодження. До другої групи належать сплави IN-738, ЗМІ-3, ЗМІ-3У, що містять хрому 12–14 % та співвідношення $Ti/Al > 1$, мають високу корозійну стійкість та більш низький рівень міцності при температурах понад 800 °С [6]. Сплави на нікелевій основі мають високу собівартість, а виготовлені із них деталі- обмежений термін роботи.

Тому, актуальним є питання визначення максимального безаварійного ресурсу робочих лопаток на стадії проектування та їх виготовлення. Оптимальний вибір матеріалу для виготовлення деталей газових турбін наземних установок вимагає значних об'ємів досліджень, особливо в умовах, що імітують експлуатаційні. Найбільш коректними є результати стендових досліджень. Вони дають можливість проаналізувати комплексний вплив експлуатаційних, конструктивних та технологічних факторів на надійність та ресурс матеріалу. Але такі дослідження тривалі за терміном та вимагають суттєвих матеріальних затрат на їх проведення, що робить зазначений підхід майже неможливим в сучасних умовах. Актуальним є визначення можливості застосування експериментально-розрахункових методів для прогнозування максимального ресурсу експлуатації деталей газових турбін.

Мета роботи

Визначення можливості застосування температурно-часових параметричних залежностей Міллера-Ларсона, Менсона-Хаферда, Шербі-Дорна для тривалого прогнозування характеристик міцності деталей, що зазнають окислювального і високотемпературного сульфідно-окислювального впливу.

Матеріал і методика досліджень

Параметричні температурно-часові залежності широко застосовуються на практиці в інженерних розрахунках внаслідок цілого ряду переваг. Вони наглядні, доволі прості, дають можливість з прийнятною достовірністю швидко розрахувати границю міцності або час до руйнування при різних температурах. Їх використання ґрунтується на умові, що температура і час є взаємно компенсуючими факторами в різних процесах високотемпературної деформації матеріалів. При більш високих температурах структурні зміни в матеріалі відбуваються інтенсивніше і, отже, метал руйнується за короткий час, ніж за менших рівнів температур. Це дає можливість прогнозувати ймовірний час до руйнування матеріалу при нижчих температурах або при суттєво менших напруженнях ніж діють на зразок [7–10].

Міллер і Ларсон, Шербі і Дорн, Менсон, Хаферд припустили, що наслідком фізичної подібності внутрішніх змін, що протікають у матеріалі під час тривалого високотемпературного навантаження, є геометрична подібність діаграм тривалої міцності. У своїх роботах вони представили результати випробувань на тривалу

міцність у вигляді залежності логарифма напруги від температурно-часових параметрів. Можливість представлення характеристик жароміцності за допомогою формул і у вигляді єдиної для всіх температур кривої тривалої міцності є однією з основних переваг цих методів. Застосування єдиної залежності дає змогу розрахувати граничні напруження або час до руйнування за будь-якої температури, що лежить в інтервалі експериментальних (фіксованих) температур, що особливо важливо під час розрахунку несучої здатності лопаток турбін.

Параметр Ларсона-Міллера [8]:

$$P = T \cdot 10^{-3} \cdot (C + \log \tau), \quad (1)$$

де τ – час до руйнування, год;

T – температура в градусах Кельвіна;

C – постійна матеріалу, яку Ларсон і Міллер вважали універсальною, однаковою для всіх матеріалів і дорівнює 20 [8]. Однак, ця величина не є оптимальною для всіх матеріалів, може мати більші чи менші значення в залежності від композиції жароміцних сплавів.

Параметр Шербі-Дорна [9]:

$$P = \log \tau - \frac{Q}{R \cdot T}, \quad (2)$$

де R – газова постійна, Дж / (моль · К);

Q – енергія активації повзучості, кДж / моль.

Параметр Менсона-Хаферда [10]:

$$P = - \frac{\log \tau - \log \tau_a}{T - T_a}, \quad (3)$$

де T , T_a постійні.

Для досліджень обрані стандартні зразки (діаметр робочої частини 5 мм, довжина 25 мм) сплавів марки ВЖЛ-12У, ЗМІ-3У. Випробування проводили на машинах типу АІМА-5-2 шляхом однобічного розтягування зразків при постійному навантаженні ($\sigma = 200\text{--}500$ МПа). Температури випробувань – 800 °С, 850 °С. Для сульфідно-окисного впливу використовували синтетичну золу: 66,2 % Na_2SO_4 , 20,4 % Fe_2O_3 , 8,3 % NiO , 3,3 % CaO , 1,8 % V_2O_5 .

Дослідження поверхневого шару і мікроструктури зразків проводили при різних збільшеннях на світловому мікроскопі МІМ-8М.

Результати досліджень

Порівняння результатів проведених досліджень і розрахунку температурно-часових параметрів свідчить, що узгодження результатів експериментального визначення тривалої міцності та розрахункового спостерігається тільки для сплавів, що зазнають окисного впливу. Всі параметричні залежності можна рекомендувати для ефективного застосовувати в інженерних розрахунках та прогнозування властивостей сплавів ЗМІ-3У, ВЖЛ-12У.

Достовірність результатів екстраполяції матеріалів в умовах сульфідно-окисної корозії залежить насамперед від корозійної стійкості сплавів. Наприклад,

дослідження сплаву ЗМІ-3У показали, що при температурі 800 °С і базі 5000 годин відмінність між тривалою міцністю від визначених за параметрами становить не більше 5 %, а при 850 °С – до 15 %.

Проведені випробування зразків сплаву ВЖЛ-12У в синтетичній золі показали розбіжність експериментального часу до руйнування зразків і розрахункового значення незалежно від параметричного методу. Наприклад, під впливом агресивного середовища та навантаження 300 МПа зразок було зруйновано через 740 годин (рис.1), а відповідно розрахункам за параметром Ларсона-Міллера – межа тривалої міцності для зазначеного часу – 160 МПа, за параметром Шербі-Дорна – 400 МПа, Менсона-Хаферда – 420 МПа.



Рисунок 1. Зовнішній вигляд зразків із сплаву ВЖЛ-12У після випробувань в синтетичній золі, час до руйнування 740 годин

Перевищення розрахункових результатів (на 35–40 %) також було відмічено і в експериментах при температурі 850 °С та базі випробувань 500 годин. Під впливом синтетичної золі та навантаження 160 МПа зразок марки ВЖЛ-12У було зруйновано через 1420 годин (рис. 2). Відповідно розрахунків за методом Шербі-Дорна час до його руйнування повинен був становити приблизно 4000 годин, а за методом Ларсона-Міллера виконати розрахунок взагалі було неможливо.



Рисунок 2. Зовнішній вигляд зразків із сплаву ВЖЛ-12У після випробувань в синтетичній золі, час до руйнування 1420 годин

Низька достовірність результатів екстраполяції для сплаву ВЖЛ12-У в агресивному середовищі пов'язана з тим, що притаманний температурно-часовим методам принцип подібності процесів, що відбуваються при високотемпературному навантаженні на короткій і тривалій часовій базі [8–10], не враховує фактор корозії.

Мікроструктура поверхневого шару зразків марки ВЖЛ-12У та ЗМІ-3У наведена на рисунках 3,4. На зразку сплаву ВЖЛ-12У (тривалість дослідження 740 годин) відмічено утворення значної кількості дрібних включень, що по морфології відповідають оксисульфідам (рис. 3а) в умовах збільшення терміну впливу синте-

тичної золи до 1400 годин відмічається міжкристалітний характер руйнування (рис. 3б). Зниження меж тривалої міцності сплаву ВЖЛ-12У у золі тим більше, чим більшою є глибина корозійного ушкодження, а зменшення робочого перерізу зразка, призводить до прискореної деформації і змішаного (внутрішньозернистого і міжзернистого) механізму руйнування.

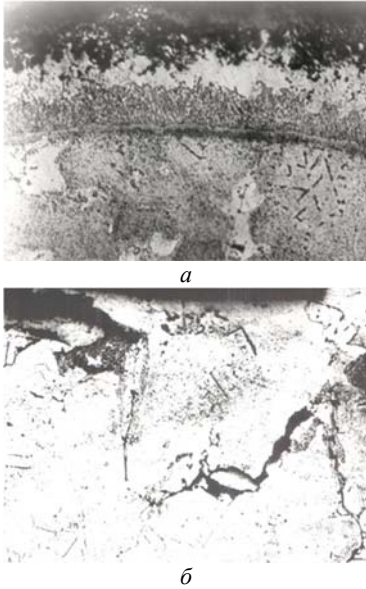


Рисунок 3. Мікроструктура поверхневого шару зразків із сплаву ВЖЛ-12У : а – час до руйнування 740 годин; б – час до руйнування 1420 годин

На відміну від жароміцного сплаву ВЖЛ-12У, сплав ЗМІ-3У має високий рівень корозійної стійкості (рис.4). В умовах агресивного впливу середовища глибина корозійного пошкодження поверхні зразків залишається незначною (база випробувань до 4000годин), а їх перетин практично не змінюється. Сульфідно-окисна корозія сплаву ЗМІ-3У протікає з утворенням щільної плівки продуктів корозії (рис. 4).

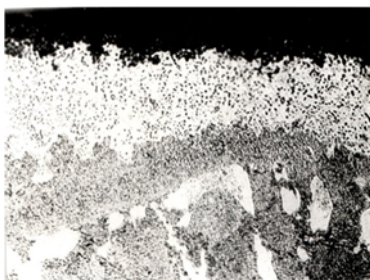


Рисунок 4. Мікроструктура поверхневого шару зразка із сплаву ЗМІ-3У (час до руйнування 1146 годин)

Під плівкою спостерігається змінений шар завтовшки 10 мкм, в якому відсутні сульфіди, що ідентифікуються металографічно. Збільшення терміну впливу корозійного середовища (до майже 4000 годин) не призвело до будь-яких видів локальних корозій, схильності до міжкристалітного руйнування не виявлено (рис 5).

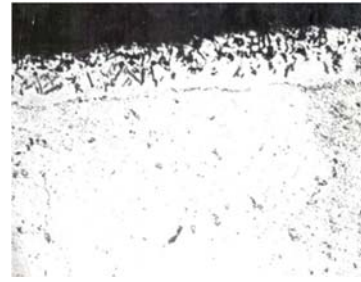


Рисунок 5. Мікроструктура поверхневого шару зразка із сплаву ЗМІ-3У (час до руйнування 3600 годин)

Стабільність структури зразків ЗМІ-3У в корозійному середовищі свідчить про можливість стверджувати про подібність процесів, що протікають на коротких та тривалих базах досліджень, а це, в свою чергу свідчить про можливість застосовувати температурно-часові параметричні залежності Міллера-Ларсона, Менсона-Хаферда, Шербі-Дорна для тривалого прогнозування характеристик міцності.

Таким чином, результати випробувань у синтетичній золі зразків сплавів за напруження 400–200 МПа вказують на безпосередню залежність тривалої міцності від ступеня корозійної пошкоджуваності поверхні зразків.

Висновки

Проведений аналіз відповідності експериментальних і прогнозованих значень меж тривалої міцності сплавів ВЖЛ-12У та ЗМІ-3У показав, що за допомогою температурно-часових параметрів можливо здійснювати попередній прогноз властивостей зазначених матеріалів в широкому діапазоні температур і часовому інтервалі лише в окислювальному середовищі.

В умовах сульфідно-окисного впливу розрахунок часу до руйнування можливий лише для корозійностійкого сплаву ЗМІ-3У. Інтенсивне корозійне пошкодження жароміцного сплаву ВЖЛ-12У, призводить до прискореної деформації, та змішаного (внутрішньозернистого і міжзернистого) механізму руйнування. Відповідно для некорозійностійких матеріалів фактор корозії превалює в механізмі руйнування, що робить тривале прогнозування неможливим незалежно від типу розрахункового методу.

Список літератури

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины : монография. часть 2 / [С. Б. Беликов, В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко и др.] –Запорожье : «Мотор Сич», 2003. – 420 с.
2. Матеріали і технології для лопаток вітчизняних промислових газотурбінних двигунів : монографія / [Г. П. Мьяльніца, А. М. Верховлюк, А. В. Нарівський та ін. ; ред. В. В. Вероцька] ; НАН України, Фіз.-технол. ін-т металів та сплавів ; проект «Наукова книга». – К. : Наукова думка, 2023. – 177 с.
3. Великанова Н. П. Влияние эксплуатационной наработки на характеристики длительной прочности

жаропрочного сплава для робочих лопаток турбін авіаційних ГТД / Н. П. Великанова, П. Г. Великанов, А. С. Киселёв // Вестник двигателестроения. – № 2. – 2011. – С. 239–243.

4. Гайдук С. В. Прогнозирование параметров структурной стабильности литейных жаропрочных никелевых сплавов. / С. В. Гайдук, В. В. Кононов // Вестник двигателестроения. – № 1. – 2017. – С. 139–148. <https://doi.org/10.15588/1727-0219-2017-1-24>

5. Прогнозування безпеки і довговічності робочих лопаток газових турбін / В. І. Шмирко, О. В. Коробко, А. О. Писарський, Ю. І. Троян // Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів» – № 3. – 2020. – Т. 26 (95), – К., 2020. – С. 63–68. <https://doi.org/10.15407/mom2020.03.063>

6. Беликов С. Б. Принципы легирования жаропрочных никелевых сплавов, стойких к высокотемпе

ратурной коррозии / С. Б. Беликов, А. Д. Коваль, Е. Л. Санчугов // Металловедение и термическая обработка металлов. – № 10. – 2001. – К., 2001. – С. 5–9.

7. Тайра С. Теория высокотемпературной прочности материалов : пер. с яп. / С. Тайра, Р. Отани. – М. : Металлургия, 1986. – 280 с.

8. Larson F. R. Time-temperature relationship for rupture and creep stresses. Trans. ASME / Larson F. R., Miller J. – 1952. – Vol. 74. – P. 765–775.

9. Dorn J. E. Some Fundamental Experiments on High Temperature Creep. : NPL, Conference on Creep and Fracture, New York : Philosophical Library, Inc. – 1957. – 89 p.

10. Manson S. S. A linear time-temperature relation for extrapolation of creep and stress rupture data / Manson S. S., Haferd A. M. – NACA-TN-2890, 1953. – P. 91–93.

Одержано 26.03.2024

ASSESSMENT OF THE CORROSION-MECHANICAL PROPERTIES OF THE LEFT MATERIALS AND FORECASTING THE SAFETY OF GAS TURBINE PARTS

- Byelikov S Dr. Sc., Professor of National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: belikov@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9510-8190
- Vinichenko V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Physical Materials Science, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: valeryi_v@ukr.net, ORCID: 0009-0001-7631-9822
- Zasovenko A. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: zasov77@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1012-6742
- Mykhaylov Y. Post-graduate student of the Department of Physical Material Science, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: uramix82@gmail.com, ORCID: 0009-0006-4930-228X
- Mykhaylov O. Post-graduate student of the Department of Physical Material Science, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: asmykhaylov@gmail.com, ORCID: 0009-0001-2471-015X
- Makarov I. Post-graduate student of the Department of Physical Material Science, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: rogivorakam@gmail.com, ORCID: 0009-0004-0054-3600
- Shmyrco V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Occupational and Environmental Safety of the National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: vera.ivanovna1968@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1489-0166

Purpose. Determination of the possibility of using the temperature-time parametric dependences of Miller-Larson, Manson-Haferd, and Sherby-Dorn for long-term prediction of the strength characteristics of parts subjected to oxidation and high-temperature sulfide-oxidation effects.

Research methods. Long-term strength studies were performed on samples of ВЖЛ-12V and 3MI-3V alloys in synthetic ash (66.2 % Na₂SO₄, 20.4 % Fe₂O₃, 8.3 % NiO, 3.3 % CaO, 1.8 % V₂O₅) and an oxidizing environment at temperatures of 800 °C and 850 °C. The Miller-Larson, Manson-Haferd, and Sherby-Dorn temperature-time parametric dependences were used to predict the tensile strength of materials in an oxidizing and corrosive environment. The microstructure of the samples was studied using an optical microscope MIM-8M.

Results. The results obtained indicate a high level of corrosion resistance of 3MI-3Y samples at 800 °C and 850 °C and the possibility of determining the tensile strength of the material for a period of 1000, 5000, and 10000 hours by the calculation method.

Tests of ВЖЛ-12У alloy samples in synthetic ash showed a discrepancy between the experimental time to fracture and the calculated value, regardless of the parametric method, which indicates a direct dependence of long-term strength on the degree of corrosion damage to the surface of the samples.

Scientific novelty. The possibility of using the Miller-Larson, Manson-Haferd, and Sherby-Dorn temperature-time parametric dependences for long-term prediction of the strength characteristics of parts in an oxidizing environment has been confirmed. In a sulfide-oxide environment, the use of parametric methods to determine strength characteristics for up to 10,000 hours is possible only for corrosion-resistant alloys. Intensive corrosion damage to ВЖЛ-12У alloy leads to accelerated deformation, which limits the use of temperature and time dependencies for effective prediction of the time of failure of parts made of this material.

Practical value. Determining a reliable method for predicting the strength characteristics of heat-resistant alloys in an oxidizing and corrosive environment allows reducing the time and financial costs of conducting lengthy field studies.

Key words: heat-resistant alloys, temperature and time dependence, oxidizing environment, sulfide-oxide corrosion, prediction.

References

1. Belikov S., Boguslaev V., Muravchenko F. (2003). Tehnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh harakteristik detalej GTD. Lopatki turbiny : monografiya. chast 2 [Technological support of operational characteristics of GTE parts. Turbine blades: monograph. part 2]. Zaporozhe, Ukraine: Motor-Sich, 420.
2. Myalnica P. (2023). Materiali i tehnologiyi dlya lopatok vitchiznyanih promislovih gazoturbinnih dviguniv [Materials and technologies for blades of domestic industrial gas turbine engines]. Kyiv, Ukraine: Scientific thought, 177
3. Velikanova N. P., Velikanov P. G., Kiselev A. S. (2011). Vliyanie ekspluatatsionnoj narabotki na harakteristiki dlitelnoj prochnosti zharoprochnogo splava dlya rabochih lopatok turbin aviacionnyh GTD. [Influence of operational hours on the strength characteristics of long working for superalloys of turbine blade of gas turbine engines]. Zaporozhye, Ukraine : Scientific and technical journal «Bulletin of Engine Construction», 2, 239–243.
4. Gayduk S., Kononov V. (2017). Prognozirovanie parametrov strukturnoj stabilnosti litejnyh zharoprochnykh nikelovykh splavov. [Structural stability parameters forecast for high-temperature nickel-base cast alloys] / Zaporozhye, Ukraine: Scientific and technical journal «Bulletin of Engine Construction», 1, 139–148. <https://doi.org/10.15588/1727-0219-2017-1-24>
5. Shmirko V., Korobko A., Pisarskij A., Troyan Yu. (2020). Prognozuvannya bezpeki i dovgovichnosti robochih lopatok gazovih turbin [Prediction of safety and durability of gas turbine blades]. Kyiv, Ukraine: Scientific and technical journal «Metal Science and Metal Processing», 3, 63–68. <https://doi.org/10.15407/mom2020.03.063>
6. Belikov S., Koval A., Sanchugov E. (2001). Principy legirovaniya zharoprochnykh nikelovykh splavov, stojkih k vysokotemperaturnoj korrozii [Principles of alloying of heat-resistant nickel alloys resistant to high-temperature corrosion]. Kyiv, Ukraine : Metallurgy and heat treatment of metals, 10, 5–9.
7. Tajra S., Otani R. (1986). Teoriya visokotemperaturnoj prochnosti materialov [Theory of viscotemperature strength of materials]. Moscow, Russia : Metallurgy, 280.
8. Larson F. R., Miller J. (1952). Time-temperature relationship for rupture and creep stresses. Trans. ASME, 74, 765–775.
9. Dorn J. E. (1957). Some Fundamental Experiments on High Temperature Creep.: NPL, Conference on Creep and Fracture. New York: Philosophical Library, 89.
10. Manson S., Haferd A. (1953). A linear time-temperature relation for extrapolation of creep and stress rupture data. NACA-TN-2890, 91–93.