

Прогнозування безпеки і довговічності робочих лопаток газових турбін

В. І. Шмирко, кандидат технічних наук, доцент кафедри, vera.ivanovna1968@gmail.com

О. В. Коробко, старший викладач кафедри, sany.kor.17@gmail.com

А. О. Писарський, старший викладач кафедри, pysarskyi.andrii@gmail.com

Ю. І. Троян, асистент кафедри, troyan.yuliyazp@gmail.com

Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя

Підвищення надійності стаціонарних газових турбін залежить від гарантованої працездатності робочих лопаток, що зазнають комплексного впливу високих температур, навантажень, агресивних середовищ. Робочі лопатки є відповідальними деталями складної геометричної форми, що виготовляються з жароміцних сплавів на нікелевій основі. Складність прогнозу тривалості їх експлуатації пояснюється відсутністю даних про міцність і корозійну стійкість сплавів на базі, яка сумірна ресурсу роботи лопаток, а проведення комплексних досліджень або натурних тривалих випробувань вимагає великих тимчасових і фінансових витрат. В даний час розрахунки границь довготривалої міцності виробляються за допомогою різних методів екстраполяції результатів короточасних випробувань. Для прогнозу жароміцних характеристик сплавів, що працюють в окисному середовищі, найбільш широко застосовуються температурно-часові рівняння тривалої міцності Міллера-Парсона, Шербі-Дорна, Менсона-Хафферда.

В роботі проведено дослідження можливості використання параметричних температурно-часових рівнянь для прогнозу жароміцності деталей, що зазнають високотемпературного сульфідно-окисного впливу, а також визначено найбільш надійний параметричний метод прогнозу часу безаварійної роботи лопаток.

Аналіз експериментальних і розрахункових значень границь довготривалої міцності показав, що в умовах агресивного впливу розрахунок часу до руйнування можливий лише для корозійностійких сплавів IN-738, ЗМІ-3У, для сплаву ВЖЛ12-У, незалежно від методу, характерне значне збільшення різниці експериментальних і екстрапольованих характеристик. Зі збільшенням часу екстраполяції до 5000 годин при 850оС і вище виконати прогноз для сплаву ВЖЛ12У неможливо. Розрахунок максимального ресурсу безаварійної роботи деталей дозволяє не тільки економити дорогі жароміцні матеріали, знизити трудовитрати на їх виготовлення і ремонт, а й підвищити надійність функціонування газотурбінних двигунів.

Ключові слова: жароміцні сплави, прогнозування, безпека, довговічність, робочі лопатки, газові турбіни, температурно-часові залежності, параметричні залежності, окисне середовище, сульфідно-окисна корозія.

Газопроводи України, що транспортують газ для власного споживання та на експорт, використовують газоперекачувальні установки ГТК-10І, ГТК-25І, ГТН-16. Використання стаціонарних газових турбін як економічного

теплогового двигуна вимагає з одного боку максимального збільшення його ресурсу, а з іншого – гарантії експлуатаційної надійності, високої питомої потужності, паливної економічності, але, найголовніше – безпеки. Безпека газотурбінного двигуна багато в чому визначається довговічністю і надійністю робочих лопаток першого ступеня, що працюють при впливі статичних і динамічних навантажень за наявності корозійноактивних продуктів згорання палива (газу), що містить сірку, натрій, хлор і інші домішки. Останні при температурах експлуатації сприяють інтенсивним процесам високотемпературної корозії, що вимагає більш часті заміни лопаток. Робочі лопатки газових турбін є відповідальними деталями складної геометричної форми, виготовляються з жароміцних сплавів. Для забезпечення надійної безаварійної роботи газоперекачувальної установки матеріал лопатки і самі робочі лопатки повинні задовольняти ряду вимог. З огляду на те, що потужність і ККД газової турбіни зростає при збільшенні початкової температури вхідних газів, лопатки повинні протистояти впливу високих температур (960-1060 °C). Крім цього, робочі лопатки в процесі експлуатації схильні до комплексного ерозійного і корозійного впливу продуктів згорання палива, а також відчувають відцентрові, статичні та динамічні вібраційні навантаження. Врахувати всі різноманітні експлуатаційні, конструктивні і технологічні фактори, що впливають на довговічність і надійність роботи лопаток, можливо тільки в процесі натурних випробувань. Такі випробування мають дуже високу вартість, потребують значних витрат ресурсів та часу і, не дивлячись на те, що мають важливе практичне і теоретичне значення, в даний час є недоцільними. Тому актуальним стало визначення гранично можливого ресурсу робочих лопаток не стільки за результатами лабораторних корозійно-механічних досліджень, скільки за допомогою найбільш розповсюджених температурно-часових параметричних методів. Для прогнозування властивостей матеріалів і розрахунку міцності і службових характеристик лопаток газових турбін необхідні значення границь довготривалої міцності зразків сплавів на базі 50-100 тисяч годин у всьому діапазоні робочих температур. Отримання цієї інформації пов'язано з проведенням великого обсягу експериментів значної тривалості.

В даний час розрахунки границь довготривалої міцності матеріалів проводяться за допомогою різних методів екстраполяції результатів короткочасних випробувань. Проведені розрахунки засновані на ідентичності процесів ушкодження сплавів, що відбуваються при короткочасних випробуваннях і протягом тривалого впливу різноманітних навантажень при високих температурах, що викликають міжзеренне руйнування внаслідок розвитку тріщини по стиках зерен або в результаті утворення пор по межах зерен. Для прогнозу жароміцних характеристик сплавів, що працюють в окислювальному середовищі, найбільш широко застосовуються параметричні температурно-часові рівняння тривалої міцності Міллера-Ларсона [1], Шербі-Дорна [2], Менсона-Хафферда [3]:

Параметр Ларсона -Міллера:

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

де τ – час до руйнування, год;

T – температура в градусах Кельвіна;

C – постійна матеріалу, яку Ларсон і Міллр вважали універсальною, однаковою для всіх матеріалів і дорівнює 20 [1]. Однак, ця величина не є оптимальною для всіх матеріалів, може мати більші чи менші значення в залежності від композиції жароміцних сплавів.

Параметр Шербі –Дорна

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

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

Q – енергія активації повзучості, кДж / моль.

Параметр Менсона-Хаферда:

$$P = - (\log \tau - \log \tau_a) / (T - T_a), \quad (3)$$

де T , T_a постійні.

Метою даної роботи було:

1. Визначення можливості використання температурно-часових рівнянь для прогнозу жароміцності деталей, що зазнають високотемпературний сульфідно-окисний вплив.

2. Визначення найбільш надійного параметричного методу для прогнозу часу безаварійної роботи лопаток.

Для визначення максимального ресурсу безаварійної експлуатації робочих лопаток, проведені комплексні дослідження, що дозволяють встановити інтервали можливого застосування температурно-часових залежностей для прогнозу довговічності сплавів в корозійно-активних середовищах. В якості матеріалу робочих лопаток найбільш широкого поширення набули сплави двох типів легування: авіаційні і корозійностійкі. До першої групи належить сплав ВЖЛ-12У (хрома 8-10 %, співвідношення $Ti/Al < 1$ і підвищений вміст вольфраму і молібдену), що має високі характеристики жароміцності і циклічної жаростійкості. У середовищі згоряння низькосортних палив, що містять сірку і ванадій, даний сплав схильний до корозійного пошкодження. До другої групи належать сплави IN-738, ЗМІ-3У, що містять хрому 12-14 %, $Ti/Al < 1$ і мають високу корозійну стійкість та більш низький рівень міцності. З урахуванням реальних умов експлуатації лопаток газових турбін сплави IN-738, ЗМІ-3У, ВЖЛ-12У досліджувалися при температурах 800 °С, 850 °С [4].

Випробування проводили на стандартних зразках (діаметр робочої частини 5 мм, довжина 25 мм) на машинах типу АІМА-5-2 шляхом одночасного розтягу зразків при постійному навантаженні з одночасним записом кривих повзучості. Відносно подовження зразків фіксувалося за допомогою механічних тензодатчиків. На кожному рівні напружень (250, 300, 350, 400, 450, 500 МПа) досліджували по три зразки. Для імітації сульфідно-окисного впливу використовували шар штучної золи газотурбінних відкладень (15 мг/см²), який оновлювали через кожні 500 годин. Склад

синтетичної золи: 66,2 % Na_2SO_4 ; 20,4 % Fe_2O_3 ; 8,3 % NiO ; 3,3 % CaO ; 1,8% V_2O_5 . Для прогнозу границь міцності сплавів, що знаходяться під тривалим (до 10000 годин) окисним або сульфідно-окисним впливом, використовували параметричні температурно-часові залежності Міллера-Ларсона [1], Шербі-Дорна [2], Менсона-Хаферда [3]. Для побудови параметричних залежностей і розрахункових кривих повзучості використовували результати експериментального визначення тривалої міцності в окисному середовищі і в синтетичній золі, а також паспортні дані сплавів. Температурно-часові параметри розраховували за формулами (1-3) з використанням даних експериментального часу до руйнування навантажених різними напруженнями зразків, представлених у вигляді сукупності значень: $\lg \sigma\text{-}P$. Можливість подання характеристик жароміцності сплавів за допомогою формул 1-3 у вигляді єдиної для всіх температур кривої тривалої міцності є однією з основних переваг даного методу. Застосування єдиної залежності дозволяє розрахувати граничні напруження, або час до руйнування при будь-якій температурі, що лежить в інтервалі експериментальних (фіксованих) температур, що особливо важливо при розрахунку несучої здатності лопаток турбін.

Сплав ВЖЛ-12У застосовується в основному для лопаток авіаційних газотурбінних двигунів, що працюють при температурі 800 °С - 1000 °С, характеризується високою жароміцністю і циклічною жаростійкістю, добре протистоїть дії окисного середовища. Однак, в середовищі згоряння палива, що містить велику кількість сірки і ванадію, даний сплав схильний до інтенсивного корозійного ушкодження, для запобігання якого застосовуються захисні покриття: CoCrAlY , CrAl , AlSi , CrAlSiTi .

Сплави IN-738, ЗМІ-3У мають компромісну композицію легуючих та мікролегуючих елементів, що забезпечує високу ВТК стійкість і дещо менші характеристики міцності при температурі понад 850 °С. Порівняння параметричних результатів свідчить, що для всіх досліджуваних сплавів в окисному середовищі, а для корозійностійких матеріалів і в золі найбільш добре узгоджуються експериментальні дані та розрахункові, що визначені за методом Міллера-Ларсона. Істотно вище (до 25 %), у порівнянні з експериментальними, значення тривалої міцності, розраховані за методом Менсона-Хаферда, причому найбільш суттєво це при температурі 900 °С. Розбіжність розрахункових і експериментальних значень на базі 5000 годин, а також неможливість визначити границі міцності для 10000 годин при 800 °С, спостерігалось в результаті застосування методу Шербі-Дорна. В умовах сульфідно-окисної корозії спостерігається збільшення різниці експериментальних і екстрапольованих характеристик сплаву ВЖЛ12-У незалежно від методу. Зі збільшенням часу екстраполяції до 5000 годин при 850 °С і вище виконати прогноз неможливо. 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 [1, 2, 3] не враховує фактор корозії.

При інтенсивній сульфідно-окисній корозії робочий переріз зразків зменшується, внаслідок чого зростають дійсні напруження, що призводять до прискорення деформації і змішаному (міжкристалітному і міжзеренному) механізму руйнування. Отже, проведені нами дослідження показали, що для некорозійностійких сплавів фактор корозії впливає на механізм руйнування і тому прогнозування властивостей на тривалий час є некоректним. На відміну від сплаву ВЖЛ-12У, сплави IN-738, ЗМІ-3У мають високу корозійну стійкість протягом тривалого часу, при цьому глибина корозійного проникнення незначна, перетин зразків залишається практично незмінним, механізм руйнування під дією зовнішніх навантажень також залишається незмінним, відповідно, зберігається і принцип подібності процесів, що відбуваються.

Таким чином, аналіз експериментальних і розрахункових значень границь довготривалої міцності показав, що за допомогою температурно-часових параметрів можливе здійснення прогнозу властивостей жароміцних сплавів в широкому діапазоні температур і часовому інтервалі. В умовах сульфідно-окисного впливу розрахунок часу до руйнування можливий лише для корозійностійких сплавів (IN-738, ЗМІ-3У). Інтенсивне корозійне пошкодження сплаву ВЖЛ12-У, що призводить до прискореної деформації, обмежує застосування температурно-часових залежностей. Розрахунок максимального ресурсу безаварійної експлуатації робочих лопаток дозволяє не тільки економити дорогі жароміцні матеріали, знизити трудовитрати на виготовлення і ремонт деталей, але і підвищити надійність функціонування газотурбінних двигунів.

Література

1. Larson F. R., Miller J. Time-temperature relationship for rupture and creep stresses. Trans // ASME. – 1952. – Vol. 74. – P. 765-775.
2. Dorn J.E. Some Fundamental Experiments on High Temperature // Creep.: NPL, Conference on Creep and Fracture, New York: Philosophical Library, Inc, 1957. – P. 89.
3. Manson S.S., Haferd A.M. A linear time-temperature relation for extrapolation of creep and stress rupture data. NACA-TN-2890, 1953, P. 91-93.
4. Шмырко В.И., Троян Ю.И. Прогнозирование прочностных свойств рабочих лопаток для повышения надежности газовых турбин. // Матеріали III Всеукраїнської заочної науково-практичної конференції «Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України». – Київ: НПУ імені М.П. Драгоманова, 2018. – С.148-150

Reference

1. Larson F. R., Miller J., ASME, 1952, Vol. 74, pp. 765-775 [in English].
2. Dorn J.E., *Conference on Creep and Fracture*, New York: Philosophical Library, Inc, 1957, pp. 89 [in English].
3. Manson S.S., Haferd A.M. *A linear time-temperature relation for extrapolation of creep and stress rupture data*, NACA-TN-2890, 1953, pp. 91-93 [in English].

4. Shmyrko V.Y., Troian Yu.Y., *Problemy tsyvilnoho zakhystu naseleння ta bezpeky zhyttiedialnosti: suchasni realii Ukrainy*, (Problematic issues related to our policy and security: the universal theory of Ukraine), Kyiv, NPU imeni M.P. Dragomanova, 2018. pp. 148-150 [in Russian].

Одержано 19.03.20

V. I. Shmyrko, A. V. Korobko, A. O. Pysarskiy, J. I. Trojan

Estimation of safety and durability of the turbine blades of gas-turbine engines

Summary

The improving reliability of stationary gas turbines depends on the guaranteed efficiency of turbine blades tested by the complex effects of high temperatures, mechanical loads, and aggressive medium.

Turbine blades are critical parts with complex geometric forms made of nickel-base superalloys.

The complexity of forecasting of their lifetime is explained by the data missing on the strength and corrosion resistance during their lifetime. The investigation of their characteristics takes much time and is expensive.

Nowadays, the long-term strength calculations are carried out using various methods of extrapolation of the results of short-term tests.

In order to forecast the high-temperature characteristics of alloys operating in an oxidizing medium, the time-temperature equations of the long-term strength by Miller-Larson, Cherby-Dorn, Manson-Haferd are most widely used.

The studies of the possibility to use parametric time-temperature equations to forecasting the heat resistance of parts tested high-temperature sulfide-oxidizing impact are presented. The most reliable parametric method of forecasting the trouble-free operation of the turbine blades has been determined.

The analysis of the experimental and calculated values of the long-term strength was showed that under aggressive conditions, the calculation of the time to rupture is possible only for the corrosion-resistant alloys IN-738, ЗМІІ-3У. A significant increase in the scattering of experimental and extrapolated features is characteristic, regardless of the method was considered. It was established to make a forecast for ВЖЛ 12У alloy with an increase in extrapolation time to 5,000 hours at 850 °C and above, it is impossible.

The maximum resource calculation of trouble-free operation of parts allows not only to save expensive heatproof materials, decrease labor efforts for their manufacture and repair process, but also to increase the reliable operation of gas-turbine engines.

Keywords: superalloys, forecasting, safety, durability, blades, gas turbines, time-temperature relation-ships, parametric dependencies, oxidative medium, sulfide-oxidizing corrosion medium.