

УДК 621.438.083

ПРОГНОЗУВАННЯ БЕЗПЕКИ І ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ГАЗОВИХ ТУРБІН

Шмирко Віра Іванівна, к.т.н., доцент кафедри «Охорони праці та навколишнього середовища», vera.ivanovna1968@gmail.com, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

Коробко Олександр Вікторович, старший викладач кафедри «Охорони праці та навколишнього середовища», sany.kor.17@gmail.com, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

Писарський Андрій Олексійович, старший викладач кафедри «Охорони праці та навколишнього середовища», pysarskyi.andrii@gmail.com, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

Троян Юлія Іванівна, асистент кафедри «Охорони праці та навколишнього середовища», troyan.yuliyazp@gmail.com, Національний університет «Запорізька політехніка», г. Запоріжжя, Україна

Анотація: 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-Ларсона, Шербі-Дорна, Менсона-Хаферда.

В роботі проведені 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 істотне збільшення різниці експериментальних і екстрапольованих характеристик. Зі збільшенням часу екстраполяції до 5000 годин при 850°C і вище виконати прогноз для сплаву ВЖЛ 12У 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 теплового 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 частішої 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 значну 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 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 експериментальних досліджень значної тривалості.

В даний час розрахунки границь довготривалої міцності матеріалів проводяться за допомогою різних методів екстраполяції результатів короточасних випробувань. Проведені розрахунки засновані на ідентичності процесів ушкодження сплавів, що відбуваються при короточасних 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-Хаферда [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 Мілльр 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

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

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

Q - енергія активації повзучості, кДж / моль.

Параметр Менсона-Хаферда:

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

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 робочих 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 даний час, 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 $Ti / A < 1$ 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%, $Ti / A < 1$ 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°C, 850°C [4].

Випробування проводили на стандартних зразках (діаметр робочої частини 5мм, довжина 25мм) на машинах типу АІМА-5-2 шляхом одновісного розтягу зразків при постійному навантаженні з одночасним записом кривих повзучості. Відносне подовження зразків фіксувалося за допомогою механічних тензодатчиків. На кожному рівні напруги (250, 300, 350, 400, 450, 500 МПа) досліджували по три зразки. Для імітації сульфідно-окисного впливу використовували шар штучної золи газотурбінних відкладень (15мг / см²), який оновлювали через кожні 500 годин. Склад синтетичної золи: 66,2% Na₂SO₄; 20,4% Fe₂O₃; 8,3% NiO; 3,3% CaO; 1,8% V₂O₅. 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-Хафферда [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: $\lg \sigma - P$. 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°C - 1000°C, 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°C. 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°C. 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 приводить 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. V.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. Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України Матеріали III Всеукраїнської заочної науково-практичної конференції. Київ: НПУ імені М.П. Драгоманова, 2018. С.148-150

Reference

1. Larson F.R. Miller J. (1952) Time-temperature relationship for rupture and creep stresses. Trans. ASME, V74, N7, p.765-775
2. Dorn J.E. (1957): Some Fundamental Experiments on High Temperature Creep.: NPL Conference on Creep and Fracture, New York: Philosophical Library, Inc., p.89.
3. Manson S.S., Haferd A.M. (1953). A linear time-temperature relation for extrapolation of creep and stress rupture data. NACA TN 2890, p.91-93.

4. Shmyrko V.Y., Troian Yu.Y. (2018). Prognozirovanie prochnostnykh svoystv rabochikh lopatok dlya povysheniya nadezhnosti gazovykh turbin. [Problematic issues related to our policy and security: the universal theory of Ukraine]. Problemy tsyvilnoho zakhystu naselennia ta bezpeky zhyttiediialnosti: suchasni realii Ukrainy Materialy III Vseukrainskoi zaochnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. (Ukraine, Kyiv, April 20, 2018). Kyiv: NPU imeni M.P. Dragomanova, 2018. pp.148-150.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Шмырко Вера Ивановна, к.т.н., доцент кафедры «Охраны труда и окружающей среды», vera.ivanovna1968@gmail.com, Национальный университет «Запорожская политехника», г. Запорожье, Украина

Коробко Александр Викторович, старший преподаватель кафедры «Охраны труда и окружающей среды», sany.kor.17@gmail.com, Национальный университет «Запорожская политехника», г. Запорожье, Украина

Писарский Андрей Алексеевич, старший преподаватель кафедры «Охраны труда и окружающей среды», pysarskyi.andrii@gmail.com, Национальный университет «Запорожская политехника», г. Запорожье, Украина

Троян Юлия Ивановна, ассистент кафедры «Охраны труда и окружающей среды», troian.yuliyazp@gmail.com, Национальный университет «Запорожская политехника», г. Запорожье, Украина

***Аннотация:** Повышение надежности стационарных газовых турбин зависит от гарантированной работоспособности рабочих лопаток, испытывающих комплексное воздействие высоких температур, напряжений, агрессивных сред. Рабочие лопатки являются ответственными деталями сложной геометрической формы, изготавливаются из жаропрочных сплавов на никелевой основе. Сложность*

прогноза продолжительности их эксплуатации объясняется отсутствием данных о прочности и коррозионной стойкости сплавов на базе, соизмеримой с ресурсом работы лопаток, а проведение комплексных исследований или натурных длительных испытаний требует больших временных и финансовых затрат. В настоящее время расчеты пределов длительной прочности производятся с помощью различных методов экстраполяции результатов кратковременных испытаний. Для прогноза жаропрочных характеристик сплавов, работающих в окислительной среде, наиболее широко применяются температурно-временные уравнения длительной прочности Миллера-Ларсона, Шерби-Дорна, Мэнсона-Хафферда.

В работе проведены исследования возможности использования параметрических температурно-временных уравнений для прогноза жаропрочности деталей, испытывающих высокотемпературное сульфидно-окисное воздействие, а также определен наиболее надежный параметрический метод прогноза времени безаварийной работы лопаток.

Анализ экспериментальных и расчетных значений пределов длительной прочности показал, что в условиях агрессивного воздействия расчет времени до разрушения возможен лишь для коррозионностойких сплавов IN-738, ЗМИ-3У, для сплава ВЖЛ12-У, независимо от метода, характерно существенное увеличение разброса экспериментальных и экстраполированных характеристик. С увеличением времени экстраполяции до 5000 часов при 850°С и выше выполнить прогноз для сплава ВЖЛ 12У невозможно. Расчет максимального ресурса безаварийной работы деталей позволяет не только экономить дорогостоящие жаропрочные материалы, снизить трудозатраты на их изготовление и ремонт, но и повысить надежность функционирования газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: жаропрочные сплавы, прогнозирование, безопасность, долговечность, рабочие лопатки, газовые турбины, температурно-временные зависимости, параметрические зависимости, окислительная среда, сульфидно-окисная коррозия.

ESTIMATION OF SAFETY AND DURABILITY OF THE TURBINE BLADES OF GAS-TURBINE ENGINES

Shmyrko Vera, PhD, docent of labor and environmental protection department, vera.ivanovna1968@gmail.com, National University «Zaporizhzhia polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine

Korobko, Alexander, senior lecturer of labor and environmental protection department, sany.kor.17@gmail.com, National University «Zaporizhzhia polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine

Pysarskiy Andrii, senior lecturer of labor and environmental protection department, pysarskyi.andrii@gmail.com, National University «Zaporizhzhia polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine

Trojan, Juliia, assistant of labor and environmental protection department, troyan.yuliyazp@gmail.com, National University «Zaporizhzhia polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine

Annotation: *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, 3MII-3V. 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 BЖЛ 12V 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.

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