

УДК 539.3

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ТРЕХКАНАЛЬНОЙ ОХЛАЖДАЕМОЙ ЛОПАТКИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ****Ю. Н. Корытко**Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»  
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина. E-mail: juliakorytko@gmail.com

Представлен метод исследований ползучести и длительной прочности конструктивных элементов, функционирующих в условиях высоких периодически изменяющихся температур. Метод реализован в виде программного комплекса, в котором методом конечных элементов выполняется решение двумерных задач теории ползучести. С использованием указанного программного обеспечения проведены комплексные расчетные исследования долговечности охлаждаемых лопаток газотурбинного двигателя. Определено влияние газового потока на внешней кромке лопатки на время до разрушения.

**Ключевые слова:** ползучесть, длительная прочность, программный комплекс, лопатки ГТД.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЗУЧОСТІ ТА ДОВГОТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ ТРЬОХКАНАЛЬНОЇ ОХОЛОДЖУВАНОЇ ЛОПАТКИ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА****Ю. М. Коритко**Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна. E-mail: juliakorytko@gmail.com

Представлено метод дослідження повзучості та довготривалої міцності конструктивних елементів, які функціонують в умовах високих періодично змінюваних температур. Метод реалізований у вигляді програмного комплексу, в якому методом скінченних елементів виконується рішення двовірних задач теорії повзучості. За використання вказаного програмного забезпечення проведені комплексні розрахункові дослідження довговічності охолоджуваних лопаток газотурбінного двигуна. Визначено вплив тиску газового потоку на зовнішній крайці лопатки на час до руйнування.

**Ключові слова:** повзучість, довготривала міцність, програмний комплекс, лопатки ГТД.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Оценка длительной прочности конструктивных элементов, функционирующих в условиях высоких температур и нагружений и накапливающих в материале необратимые деформации ползучести, является важной комплексной задачей в современном машиностроении. Для решения такой задачи необходимо использовать метод расчетных исследований, основанный на определяющих соотношениях ползучести и длительной прочности, учитывающих особенности динамики температурных полей, под влиянием которых находятся рассматриваемые конструктивные элементы. Программное обеспечение, реализующее метод исследований длительной прочности, должно позволять моделировать сложную геометрическую форму конструктивных элементов и визуализировать результаты исследований.

Цель работы – исследование ползучести и длительной прочности трехканальной охлаждаемой лопатки газотурбинного двигателя.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Для расчетных исследований долговечности конструктивных элементов использованы уравнения состояния ползучести и связанного с ней накопления повреждаемости, учитывающие периодический характер действия нагрузок и температур [1, 2]. Используемые уравнения состояния получены на основе концепции континуальной механики повреждаемости, учитывают основные физико-механические эффекты термосилового эксплуатационного нагружения и отвечают всем физическим требованиям к определяющим соотношениям. С помощью данных определяющих соотношений

можно с достаточно высокой точностью описать нелинейное деформирование материала и изменение параметра повреждаемости при совместном действии статических и периодически изменяющихся составляющих нагружения, статических и периодически изменяющихся составляющих температур.

В качестве метода расчетного оценивания долговечности конструктивных элементов высокотемпературной техники выбран метод конечных элементов. Алгоритм конечно-элементного расчета основан на использовании метода прогноза-коррекции для пошагового интегрирования по времени совместно с методом Холлеца для решения систем линейных алгебраических уравнений. Данный алгоритм реализован в программном комплексе, который позволяет моделировать двумерные задачи ползучести (плоское напряженное состояние, плоская деформация и обобщенное плоское напряженно-деформированное состояние) [3, 4].

Расчеты ползучести и повреждаемости вследствие ползучести требуют задания геометрических характеристик модели, физико-механических особенностей материала, данных относительно термосиловых полей, в которых функционирует элемент конструкции. Построение матриц жесткости конечных элементов и на их основе матрицы жесткости всей модели в используемом программном комплексе осуществляется в специальной функции MATRGS. Для вычисления вектора узлового нагружения предназначена функция PG. Поверхностные силы, приложенные на части поверхности, могут вычисляться в программном комплексе как сосредоточенные или

распределенные (внутреннее или внешнее давление). Также в этой функции вычисляются эквивалентные узловые силы, обусловленные неоднородностью температурного поля. Функции CREFOR и CREFORPL предназначены для вычисления векторов сил, возникающих вследствие деформаций ползучести. Функция CREFOR выполняется для задач, рассматривающих осесимметричные тела и конструкции, функция CREFORPL – для схем плоской деформации и плоского напряженного состояния. Решение полученной системы линейных алгебраических уравнений осуществляется методом Холецкого при помощи функций CHOBANDD и CHOBANDS. Функции STRESS и STRESSPL вычисляют для осесимметричных и плоских задач соответственно деформации ползучести и компоненты тензоров деформаций и напряжений в каждом конечном элементе. Метод прогноза–коррекции третьего порядка, предназначенный для интегрирования начально-краевой задачи ползучести, реализован в функции PRECOR. Учет периодического изменения температурно-силового поля конструктивного элемента с разными параметрами цикла осуществляется в специально созданных функциях, каждая из которых реализует соответствующую форму цикла (трапециевидную, прямоугольную, синусоидальную и т.д.)

После получения результатов конечно-элементного расчета осуществляется визуализация распределения искомой величины по всей модели. Треугольные конечные элементы, на которые разделена модель, помечаются тем цветом, который соответствует определенному значению шкалы градаций в соответствии со значением величины в центре масс элемента.

Расчет на длительную прочность лопаток газотурбинного двигателя является сложной задачей, требующей выполнения комплексного анализа и учета многих факторов функционирования лопаток. Более простым случаем являются исследования сплошных, неохлаждаемых лопаток. Такие лопатки испытывают в основном напряжения растяжения от центробежных сил и напряжения изгиба от газового давления и центробежных сил, а также вибрационные напряжения. Прочность неохлаждаемых лопаток оценивают с помощью запаса длительной прочности, как отношение длительной прочности материала при заданной температуре к максимальному по сечению лопатки действующему напряжению. Температура материала лопатки определяется по температуре газа перед лопатками [5].

Принципиальное отличие расчета на прочность охлаждаемой лопатки состоит в том, что такой расчет выявляет допустимую температуру лопатки, в зависимости от которой при тепловом расчете определяется необходимая глубина охлаждения, система охлаждения и потери охлаждаемого воздуха.

В бесполочной лопатке наиболее опасное сечение расположено около сечения на середине высоты лопатки, поэтому оценка длительной прочности

всей лопатки часто осуществляется по результатам расчета среднего сечения [5]. Температурный режим работы лопаток очень сложен для анализа. Прямо определить температуру кромок лопатки тяжело, к тому же, в зависимости от назначения двигателя, расположения, геометрии и многих других характеристик функционирования лопаток, температурное поле сечения лопатки будет существенно отличаться. В первом приближении температуру поверхностей лопатки определяют по температуре газового потока [6]. В тоже время необходимо учитывать, что температура газового потока вдоль поверхности лопатки не является постоянной, а периодически изменяется в реальных условиях функционирования лопаток [7]. Периодический характер изменения температурного поля существенно влияет на характеристики длительной прочности трехканальной охлаждаемой лопатки газотурбинного двигателя с выводом охладителя на внешнюю кромку.

Для исследования ползучести и длительной прочности лопатки созданы геометрическая и конечноэлементная модели среднего по длине сечения рассматриваемой лопатки [8], которые представлены на рис. 1, размеры приведены в мм.

Конечноэлементная модель содержит 1793 элемента, 1117 узлов. Материал лопатки – сплав инконель IN738LC, свойства которого при температуре 1123 К составляют: модуль упругости  $E=1,64 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ , коэффициент линейного расширения  $\alpha = 1,3 \cdot 10^{-5}$  1/град. В работе [9] приведено температурное поле среднего сечения рассматриваемой лопатки, которое изменяется от 1273 К до 1193 К. Полученная модель неоднородного температурного поля для данной конфигурации конечных элементов представлена на рис. 2.

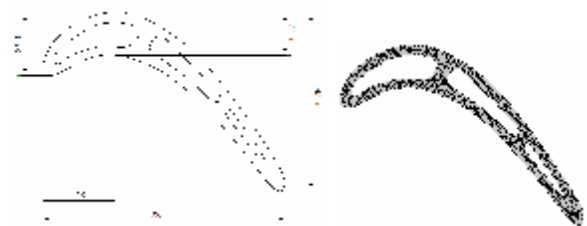


Рисунок 1 – Геометрическая и конечноэлементная модели сечения лопатки

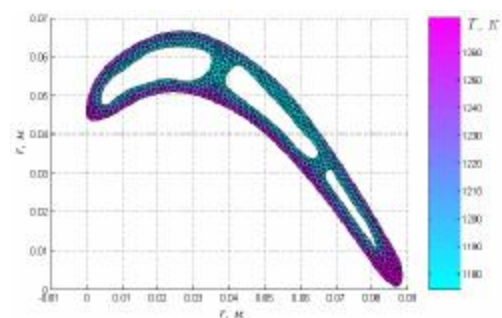


Рисунок 2 – Температурное поле среднего сечения лопатки

Распределение температуры по сечению охлаждаемой лопатки, представленное на рисунке 2, при- сущее только переходным режимам работы ГТД: повышение скорости, изменение мощности, возвра- щение на номинальный режим и т.д. Такие переход- ные режимы работы занимают по времени примерно 18 с, а примерно каждые 180 с происходит измене- ние мощности или скорости, что означает начало переходного режима. При стабилизированном ре- жиме работы лопатки находятся в однородном тем- пературном поле, значение температуры при этом значительно ниже, чем при переходном режиме и составляет 773 К.

Неоднородность температурного поля является причиной возникновения напряжений в лопатке. На рисунке 3 представлено распределение интенсивно- сти напряжений, вызванных только действием неод- нородного температурного поля от 1193 К до 1273 К.

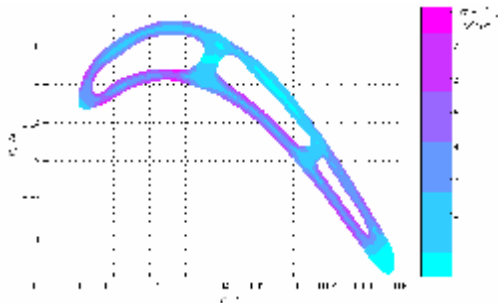


Рисунок 3 – Интенсивность напряжений, вызванных неоднородным температурным полем

Примем, что давление газового потока на вход- ной кромке лопатки составляет примерно 0,2–0,5 МПа в зависимости от мощности работы двигателя. В соответствии с методикой исследования лопаток ГТД [10], анализ длительной прочности проводился по расчетам ползучести и связанного с ней накопле- ния повреждаемости.

На рис. 4 представлены распределения интен- сивности напряжений по сечению трехканальной охлаждаемой лопатки при давлении газового потока на входной кромке 0,2 МПа (а) и при давлении 0,5 МПа (б).

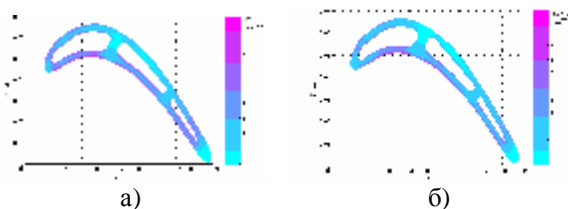


Рисунок 4 – Интенсивность напряжений, вызванных одновременным действием температурного поля и давления на входной кромке  
а) 0,2 МПа, б) 0,5 МПа

При расчетах учитывалось циклическое измене- ние напряжений, вызванных действием неоднород- ного температурного поля по среднему опасному сечению лопатки. Влияние изменения напряжений и температуры на оценку длительной прочности осу-

ществлялось вычислением в каждом конечном эле- менте функций основных и амплитудных состав- ляющих напряжений и температуры соответственно в каждый момент интегрирования по времени. По результатам комплексных расчетных исследований выявлено, что периодическое изменение темпера- турно-силового режима работы лопаток существен- но влияет время до разрушения, которое также су- щественно зависит от параметров цикла изменения температуры и напряжений, таких как период цикла, форма, максимальное значение в цикле и других параметров.

Результаты вычислений показали, что при дав- лении газового потока на входной кромке 0.2 МПа время возникновения макродефектов в лопатке со- ставляет 13800 часов бесперебойной работы газо- турбинного двигателя. При давлении 0,5 МПа это значение составляет 3050 часов.

На рис. 5 и 6 представлены распределения пара- метра повреждаемости по среднему сечению охла- ждаемой лопатки и распределение интенсивности напряжений соответственно при значении времени 3000 часов при давлении на внутренней кромке 0,5 МПа. Сравнение данных рис. 6 и 4,б показывает, что максимальное значение интенсивности напряжений уменьшилось от начального момента до момента окончания скрытого разрушения от 112 МПа до 100 МПа. Учет циклического изменения напряжений, вызванных действием неоднородного температур- ного поля, и непосредственно самого периодическо- го изменения температуры существенно увеличива- ет скорость деформирования при ползучести и ско- рость накопления повреждаемости, что приводит к значительному уменьшению времени до разрушения конструктивного элемента.

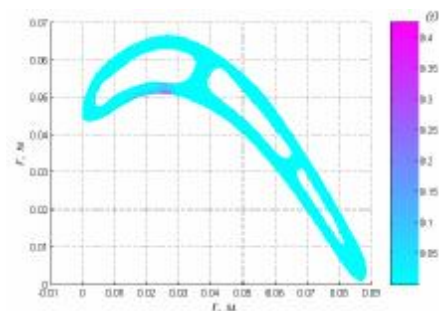


Рисунок 5 – Распределение параметра повреждаемости при 3000 часов, давление на входной кромке 0.5 МПа

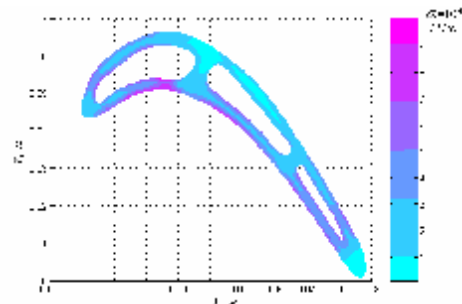


Рисунок 6 – Распределение интенсивности напряжений при 3000 часов, давление на входной кромке 0.5 МПа

Для анализа влияния давления газового потока на время до разрушения охлаждаемой лопатки проведены исследования, в которых оценивалась длительная прочность лопатки при различных значениях давления, но при одинаковых условиях эксплуатации, характеризующихся циклическими сменами температурного поля. По полученным данным построен график зависимости времени окончания скрытого разрушения в охлаждаемой лопатке газотурбинного двигателя при непрерывной работе двигателя от значения давления на входной кромке лопатки (рис. 7).

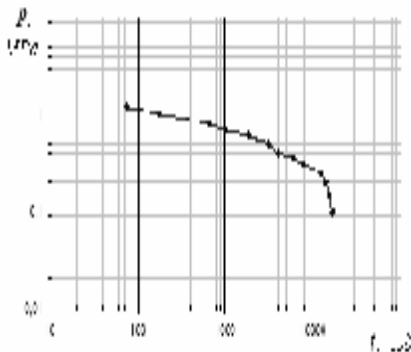


Рисунок 7 – График зависимости времени окончания скрытого разрушения от значения давления на входной кромке лопатки

По результатам, представленным на графике, можно сделать вывод о том, что увеличение давления на входной кромке лопатке приводит к уменьшению времени до разрушения лопатки. На графике в логарифмических координатах различимы два участка, разделенные значением давления в 0,25 МПа, отличающиеся наклоном кривой. Рабочие значения давления на входной кромке лопатки 0,2–0,5 МПа относятся к более пологому участку. При анализе графика необходимо учитывать сложность процедуры вычисления скорости ползучести и связанного с ней накопления повреждаемости при периодическом изменении температурно-силового нагружения.

Необходимо отметить, что точно напрямую определить по графику значение времени окончания скрытого разрушения при промежуточных значениях давления на входной кромке невозможно. Такая задача требует специальных исследований, учитывающих полную конфигурацию особенностей функционирования и нагружения лопатки.

**ВЫВОДЫ.** В статье представлено программное обеспечение, предназначенное для численного решения методом конечных элементов задачи ползучести и накопления повреждаемости в элементах конструкций, функционирующих в условиях высоких, периодически изменяющихся температур и силовых полей. При помощи указанного программного обеспечения решена задача анализа длительной прочности трехканальных охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей. Определено время окончания процесса скрытого разрушения в лопатках при различных параметрах внешних воздействий.

Установлено, что учет периодического изменения напряжений, вызванных действием неоднородного температурного поля и самого периодического изменения температуры, существенно увеличивает скорость деформирования при ползучести и скорость накопления скрытых разрушения, что приводит к значительному уменьшению времени до разрушения лопаток.

Приведены результаты анализа длительной прочности трехканальной охлаждаемой лопатки газотурбинного двигателя (ГТД), полученные использованием рассмотренного метода исследований. Сделаны выводы относительно влияния эксплуатационных параметров на характеристики долговечности лопаток газотурбинных двигателей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Cyclic thermal creep model for the bodies of revolution / D.V. Breslavs'kyi, Yu.M. Korytko, O.K. Morachkovs'kyi // *Strength of Materials*. – 2011. – V. 43, № 2. – PP. 134–143. (Translated from *Problemy Prochnosti*, No. 2, pp. 33–46, March – April, 2011)
2. Повзучість та пошкоджуваність елементів конструкцій при високотемпературному циклічному навантаженні / Д.В. Бреславський, Ю.М. Коритко, О.К. Морачковський, О.А. Татарінова // *Праці міжнародної науково-технічної конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування»*, 21–24 вересня 2009 р. – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя, 2009. – С. 40–46.
3. Свідство про реєстрацію авторського права на твір. № 34779. Україна. Комп'ютерна програма «Divider 2.6с»: комп'ютерна програма / Д.В. Бреславський, П.М. Лисак, Ю.М. Коритко. – Дата реєстрації 2.09.2010.
4. Программный комплекс для решения задач ползучести осесимметричных элементов конструкций / Д.В. Бреславский, О.К. Морачковский // *ПС РФАП УССР*, инв. № П6345, № гос.рег. 5088001310, 1988. – 99 с.
5. Абианц В.Х. Теория авиационных газовых турбин. – М.: Машиностроение, 1979. – 246 с.
6. Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей / В.М. Акимов, В.И. Бакулев, Р.И. Курзинер и др. – М.: Машиностроение, 1987. – 568 с.
7. Особенности теплового нагружения лопаток турбины ГТД с управляемыми поворотными лопатками соплового аппарата / И.Д. Гаркуша, А.И. Гаркуша // *Сборник статей «Летательные комплексы. Проектирование, моделирование, испытание, эксплуатация»*; под ред. В.И. Диденко. – 1995. – С. 71–76.
8. Кампсти Н. Аэродинамика компрессоров. – М.: Мир, 2000. – 688 с.
9. Designing turbine blades for fatigue and creep / B. Dambrine, J.P. Mascarell // *Defense Science Journal*. – 1988. – V. 38, № 4. – PP. 413–429.
10. Viswanathan R. Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components. – Metals Park, Ohio: ASM International, 1995. – 497 p.



# **CREEP AND LONG TERM STRENGTH ANALYSIS OF THREE-CHANNEL COOLED BLADE OF GAS TURBINE ENGINE**

**Yu. Korytko**

National Technical University «Kharkiv Politechnic Institute»

ul. Frunze, 21, 61002, Kharkiv, Ukraine. E-mail: juliakorytko@gmail.com

The paper presents a method for creep and long term strength analysis of structural elements working at high temperature that is periodically variable. The software for the implementation of the method developed is based on the finite element method and allows solving of two-dimensional problems of the creep theory. Integrated numerical investigations of durability of cooled blades of a gas turbine engine were performed on the bases of the software mentioned. The influence of gas stream pressure, that effects on the external edge of the blade, on a time to failure parameter is determined.

**Key words:** creep, long term strength, software, blade of gas turbine engine.

## **REFERENCES**

1. Breslavs'kyi D.V. *Cyclic thermal creep model for the bodies of revolution* / D.V. Breslavs'kyi, Yu.M. Korytko, O. K. Morachkovs'kyi // *Strength of Materials*. – 2011. – V. 43, № 2. – PP. 134–143. (Translated from Problemy Prochnosti, No. 2, pp. 33 – 46, March – April, 2011).
2. Creep and damage of structural elements under high temperature cyclic loading / D.V. Breslavs'kyi, Y.M. Korytko, O.K. Morachkovs'kyi, O.A. Tatarinova // *In-service damage of materials, its diagnostics and prediction: proceedings of International conference*, September 21–24, 2009. – Ternopil, Ternopil Ivan Pul'uj National technical university. – 2009. – PP. 40–46. [in Ukrainian]
3. Certificate about registration of copyright on writing. № 34779. Ukraine. *Computer program «Divider 2.6c»: computer program* / D.V. Breslavs'kyi, P.M. Lysak, Y. M. Korytko. – Date of registration 2.09.2010. [in Ukrainian]
4. Breslavskyi D.V. *Software for solving creep problems of axisymmetric structural elements* / D. V. Breslavskyi, O. K. Morachkovskyi // № П6345, № 5088001310. – 1988. – 99 p. [in Russian]
5. Abianz V.H. *Theory of aviation gas turbine* / V.H. Abianz. – M.: Machine building, 1979. – 246 p.[in Russian]
6. Akimov V.M. *Theory and calculation air-jet engines* / V.M. Akimov, V.I. Bakulev, R.I. Kuziner, V.V. Polyakov, V.A. Sosunov, S.M. Shliahtenko. – M.: Machine building, 1987. – 568 p. [in Russian]
7. Garkusha I.D. Features of heat loading of gas turbine engine blades with control rotary blades of nozzle block / I.D. Garkusha, A.I. Garkusha // *Papers collector under V.I.Didenko "Aircraft complexes. Designing. Modeling. Testing. Service"*. – 1995. – PP. 71–76. [in Russian]
8. Kampsti N. *Aerodynamics of compressors* / N. Kampsti. – M.: Mir, 2000. – 688 p. [in Russian]
9. Dambrine B. Designing turbine blades for fatigue and creep / B. Dambrine, J.P. Mascarell // *Defense Science Journal*. – 1988. – V. 38, № 4. – PP. 413–429.
10. Viswanathan R. *Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components* / R. Viswanathan. – Metals Park, Ohio: ASM International, 1995. – 497 p.

Стаття надійшла 23.03.2012.

Рекомендовано до друку  
д.т.н., проф. Драгобецьким В.В.