

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2023-85-4-551-564

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ*

© 2023 г.

**Волков И.А., Игумнов Л.А.,
Костюков В.Е., Прилуцкий М.Х.**

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

pmptmvgavt@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.09.2023

Рассматриваются методологические аспекты оценки ресурса объектов новой техники (элементов газотурбинных двигателей), режимы эксплуатации которых приводят к нестационарным термомеханическим нагрузениям. Моделируются связанные термовязкопластические процессы деформационного и поврежденного состояний деградируемого континуума. Описана модель термической усталости в поликристаллических конструкционных сплавах для произвольных сложных траекторий деформирования, состоящая из соотношений, определяющих циклическое термовязкопластическое деформирование, эволюционных уравнений накопления повреждений и критерия прочности поврежденного материала. Кинетические уравнения, учитывающие эффекты нелинейного накопления повреждений, основываются на введении скалярного параметра поврежденности и базируются на энергетических принципах. Связанная формулировка кинетических уравнений накопления повреждений при малоцикловой усталости и длительной прочности описывает нелинейный характер суммирования повреждений. В качестве критерия прочности поврежденного материала служит условие достижения величиной поврежденности критического значения.

С использованием разработанного оригинального методического, алгоритмического и программного обеспечения, позволяющего проводить сквозное численное моделирование термоциклических процессов, решена задача оценки термоциклической долговечности моделей элементов и узлов газотурбинных двигателей при термопульсациях. Представлены результаты анализа влияния на термоциклическую долговечность угла наклона охлаждающих каналов в модели труб камер сгорания. Рассмотрены вопросы влияния сложного термоциклического деформирования, накопления усталостных повреждений, пластических деформаций и деформаций ползучести на термическую усталость элементов конструкций. Проведен сравнительный анализ численных результатов с экспериментальными данными. Подтверждена работоспособность модели для описания процесса термической усталости материалов и конструкций при многоосных непропорциональных путях термоциклического нагружения.

* Выполнено при поддержке РФ (проект №22-19-00138).

Ключевые слова: термоциклическая долговечность, поврежденная среда, вязкопластичность, сложное деформирование, макроскопическая трещина, прочность, разрушение.

Введение

Эксплуатация объектов критической инфраструктуры характеризуется значительным увеличением удельного веса нестационарных режимов нагружения и расширением рамок температурного диапазона работы конструкций. Требования к безопасности, надежности и длительной эксплуатации ужесточаются. Одной из основных задач эффективного управления таким объектом становится достоверный расчет его прочностных характеристик, диагностика выработанного и прогноз остаточного ресурса [1, 2]. Из соответствующих инженерных объектов выделим те, которые ориентированы на длительные сроки эксплуатации (нефтегазовое оборудование, газотурбинные двигатели и установки нового поколения, атомные электростанции и др.). Решение основных задач определения ресурса опирается на учет локального проявления деградационных процессов в «опасных» зонах объекта, проходящих с повышенной скоростью, что позволяет рассчитывать ресурс конструкционных элементов по деградационным процессам. Параметры деградационных процессов сильно различаются в зависимости от физико-механических и прочностных свойств конструкционных сплавов, характерных особенностей изготовления и ряда других факторов.

Методология эксплуатационного мониторинга ресурса предложена в [2]. В основу подхода положен метод математического моделирования в рамках механики поврежденной среды и механики разрушения. Подход позволяет учитывать нештатные режимы эксплуатации объекта, реальные физико-механические характеристики материала и ряд запроектных состояний. Методами неразрушающего контроля проверяется состояние материала «опасных» зон.

При термомеханических воздействиях выявляются свои характерные деградационные механизмы, приводящие к снижению усталостной долговечности. Существенными являются скорость изменения нагрузки (механической деформации) и температуры, продолжительность (длительность) цикла нагружения. При оценке долговечности общее количество циклов до разрушения становится неполной характеристикой долговечности, необходимо учитывать время до разрушения [3–6]. Различие механизмов разрушения является результатом разных процессов повреждаемости. Один из этих процессов происходит при доминирующем влиянии пластической деформации, которая зависит только от изменения нагрузки без учета ее времени действия. Такие повреждения накапливаются внутри зерна и приводят к транскристаллитному характеру разрушения. Поврежденность от нестационарной деформации ползучести зависит от истории нагружения, времени действия нагрузки и приводит к развитию поврежденности по границе зерен. Возникает межкристаллическое разрушение. Синергетические эффекты взаимного влияния механизмов поврежденности протекают в промежуточной области, где оба вида процесса разрушения происходят одновременно. Долговечность в этой области определяется суммированием поврежденности, вызванной обоими процессами [7, 8]. В [7–10] предложен вариант модели поврежденной среды для связанных процессов неизотермического вязкопластического деформирования и накопления повреждений при многоосных непропорциональных режимах циклического термомеханического нагружения.

В настоящей статье на основе общего подхода и модели для связанной термо-механической постановки приводятся результаты расчетов ресурсных характеристик моделей жаровых труб камер сгорания современных газотурбинных двигателей при термопульсациях.

1. Основные соотношения модели механики поврежденной среды

Основными уравнениями модели, предложенной в [7, 8] и развитой в [9, 10], являются определяющие соотношения термовязкопластичности: термопластичность [11], термоползучесть [12], эволюционные уравнения накопления повреждений и критерий прочности поврежденного материала [8].

Термовязкопластичность

– уравнение текучести Мизеса:

$$F_p = S_{ij} S_{ij} - C_p^2 = 0, \quad S_{ij} = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}^p, \quad (1)$$

где σ'_{ij} – компоненты девиатора напряжений, C_p и ρ_{ij}^p – соответственно радиус и координаты центра поверхности текучести;

– уравнение поверхности циклической «памяти»:

$$a_e = (e_{ij}^p - \xi_{ij})(e_{ij}^p - \xi_{ij}) - c_{\max}^2 = 0, \quad (2)$$

где e_{ij}^p – компоненты тензора пластических деформаций, а c_{\max} и ξ_{ij} – максимальные значения интенсивности пластических деформаций и односторонне накопленных пластических деформаций соответственно;

– эволюционное уравнение для радиуса поверхности текучести:

$$C_p = C_p^0 + \int_0^t \dot{C}_p dt, \quad \dot{C}_p(\chi, T) + \dot{C}_p^{mon} + \dot{C}_p^{p(cyc)} + \dot{C}_p^T, \quad (3)$$

$$\dot{C}_p^{mon}(\chi, T) = q_\chi \dot{\chi}_p, \quad \dot{C}_p^{p(cyc)} = a_p (Q_p^p + C_p^{p(cyc)}) \dot{\chi}_p^{cyc},$$

$$\dot{C}_p^{c(cyc)} = a_p (Q_p^c + C_p^{c(cyc)}) \dot{\chi}_c^{cyc}, \quad \dot{C}_p^T = q_T \dot{T}, \quad (4)$$

$$q_\chi = q_2 A + (1 - A) q_1, \quad Q_p^p = Q_2^p A + (1 - A) Q_1^p, \quad Q_p^c = Q_2^c A + (1 - A) Q_1^c,$$

$$A = 1 - \cos^2 \Theta, \quad \cos \Theta = n_{ij}^e n_{ij}^s, \quad n_{ij}^e = \frac{\dot{e}_{ij}^p}{(\dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p)^{1/2}}, \quad n_{ij}^s = \frac{S_{ij}}{(S_{ij} S_{ij})^{1/2}}, \quad (5)$$

$$\dot{\chi}_p^{cyc} = \begin{cases} \dot{\chi}_p & \text{при } a_e < 0 \vee e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \leq 0, \\ 0 & \text{при } a_e = 0 \wedge e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \geq 0, \end{cases} \quad \chi_p = \int_0^t \dot{\chi}_p dt, \quad \dot{\chi}_p = \left(\frac{2}{3} \dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \right)^{1/2}, \quad (6)$$

$$\dot{\chi}_p^{mon} = \begin{cases} 0 & \text{при } a_e < 0 \vee e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \leq 0, \\ \dot{\chi}_p & \text{при } a_e = 0 \wedge e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \geq 0, \end{cases}$$

где C_p^0 – значение начального радиуса поверхности текучести; q_1, q_2, q_T – параметры монотонного изотропного упрочнения; $Q_1^p, Q_2^p, Q_1^c, Q_2^c$ – параметры циклического изотропного упрочнения; χ_p – длина пути пластического деформирования, а $\chi_p^{mon}, \chi_p^{cyc}, \chi_c^{cyc}$ – длины путей пластического деформирования на монотонных участках, на участках циклического нагружения и на участках выдержки под нагрузкой соответственно;

– уравнение для смещения центра поверхности текучести:

$$\rho_{ij} = \int_0^t \dot{\rho}_{ij} dt, \quad \dot{\rho}_{ij} = \dot{\rho}_{ij}^p + \dot{\rho}_{ij}^c, \quad \dot{\rho}_{ij}^p = f(\chi)(\dot{\rho}_{ij}^m + \dot{\rho}_{ij}^r), \quad \dot{\chi} = \dot{\chi}_p + \dot{\chi}_c, \quad (7)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^m = g_1^p \dot{e}_{ij}^p - g_2^p \rho_{ij}^p \dot{\chi} + g_T^p \rho_{ij}^p \langle \dot{T} \rangle, \quad \dot{\rho}_{ij}^r = g_1^r \dot{e}_{ij}^p - g_2^r \left(\frac{\rho_{\min} - \rho_u^r}{\rho_u^r} \right) \rho_{ij}^r \dot{\chi} \cos \gamma + g_T^r \rho_{ij}^r \langle \dot{T} \rangle, \quad (8)$$

$$\cos \gamma = \begin{cases} \frac{\dot{\rho}_{ij} \rho_{ij}^r}{(\dot{\rho}_{ij} \dot{\rho}_{ij})^{1/2} (\rho_{ij}^r \rho_{ij}^r)^{1/2}} & \text{при } \cos \gamma < 0, \\ 0 & \text{при } \cos \gamma > 0, \end{cases} \quad (9)$$

$$\rho_u^r = (\rho_u^r \rho_u^r)^{1/2}, \quad g_T^{p,r} = \frac{1}{g_1^{p,r}} \left[\frac{\partial g_1^{p,r}}{\partial T} \right],$$

$$f(\chi) = f(\chi_p^{mon}) + f(\chi_p^{cyc}) + f(\chi_c) + f(\chi_\xi), \quad (10)$$

$$f(\chi_{c,\xi}) = 1 + k_1^{c,\xi} (1 - \exp(-k_2^{c,\xi} \chi_{c,\xi})),$$

где $g_1^{p,r}$, $g_2^{p,r}$, $k_1^{c,\xi}$, $k_2^{c,\xi}$ – параметры материала. Для \dot{T} выполняется условие:

$$\langle \dot{T} \rangle = \begin{cases} \dot{T} & \text{при } \dot{T} > 0, \\ 0 & \text{при } \dot{T} \leq 0; \end{cases}$$

– уравнения семейства эквипотенциальных поверхностей ползучести:

$$F_c^{(n)} = S_{ij}^{c(n)} S_{ij}^{c(n)} - C_c^{2(n)} = 0, \quad S_{ij}^{c(n)} = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (11)$$

– уравнение поверхности ползучести нулевого уровня:

$$F_c^{(0)} = \bar{S}_{ij}^c \bar{S}_{ij}^c - \bar{C}_c^2 = 0, \quad \bar{S}_{ij}^c = \bar{\sigma}'_{ij} - \rho_{ij}, \quad (12)$$

где \bar{S}_{ij}^c и $\bar{\sigma}'_{ij}$ – совокупность напряженных состояний, отвечающих нулевой скорости ползучести;

– соотношение для радиуса поверхности ползучести нулевого уровня

$$\bar{C}_c = \bar{C}_c^{mon}(\chi_c^{mon}, T) + \bar{C}_c^{cyc}(\chi_c^{cyc}, T),$$

$$\bar{C}_c^{cyc} = \bar{C}_c^{0cyc} + \int_0^t \dot{\bar{C}}_c^{cyc} dt, \quad \bar{C}_c^{cyc} = a_c (Q_c^p - C_c^{cyc}) \dot{\chi}_c^{cyc}, \quad Q_c^p = Q_2^c A + (1 - A) Q_1^c,$$

$$\dot{\chi}_c = \left(\frac{2}{3} \dot{e}_{ij}^c \dot{e}_{ij}^c \right)^{1/2}, \quad \chi_c = \int_0^t \dot{\chi}_c dt,$$

$$\dot{\chi}_c^{mon} = \begin{cases} 0 & \text{при } a_e < 0 \vee e_{ij}^c e_{ij}^c \leq 0, \\ \dot{\chi}_c & \text{при } a_e = 0 \wedge e_{ij}^c e_{ij}^c \geq 0, \end{cases} \quad \dot{\chi}_c^{cyc} = \begin{cases} \dot{\chi}_c & \text{при } a_e < 0 \vee e_{ij}^c e_{ij}^c \leq 0, \\ 0 & \text{при } a_e = 0 \wedge e_{ij}^c e_{ij}^c \geq 0, \end{cases} \quad (13)$$

$$\lambda_c = \lambda_c(\psi_c, T) = \lambda_c \psi_c, \quad \lambda_c = \begin{cases} 0, & \psi_c \leq 0, \\ \lambda_c, & \psi_c > 0, \end{cases} \quad \psi_c = \frac{\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c - \bar{C}_c}}{C_c},$$

где \bar{C}_c^{mon} и λ_c – экспериментальные функции;

– уравнение для смещения координат центра поверхностей ползучести [12]:

$$\dot{\rho}_{ij}^c = g_1^c \dot{e}_{ij}^c - g_2^c \rho_{ij}^c \dot{\chi} + g_T^c \rho_{ij}^c \langle \dot{T} \rangle,$$

где g_1^c и $g_2^c > 0$ – параметры материала;

– закон градиентальности:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = \lambda_c(\psi_c, T) S_{ij}^c = \lambda_c \psi_c S_{ij}^c = \lambda_c \left(\frac{\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c} - \bar{C}_c}{C_c} \right) S_{ij}^c,$$

откуда

$$\dot{\chi}_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \lambda_c \left(\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c} - \bar{C}_c \right).$$

Значение параметра λ_c зависит от участка кривой ползучести (рис. 1).

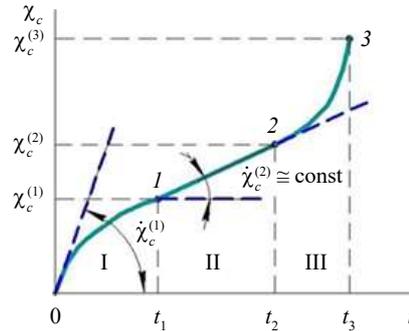


Рис. 1. Зависимость длины траектории деформации ползучести от времени процесса при многоосном деформировании по лучевым траекториям

Для участка $(0, \chi_c^{(1)})$

$$\lambda_c^I = \lambda_c^{(0)} \left(1 - \frac{e_{11}^c}{e_{11}^{c(1)}} \right) + \lambda_c^{(1)} \frac{e_{11}^c}{e_{11}^{c(1)}}, \quad (14)$$

где $\lambda_c^{(0)}$ и $\lambda_c^{(1)}$ – значения в точках 0 и I.

Для участка $(\chi_c^{(1)}, \chi_c^{(2)})$

$$\lambda_c^{II} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}_{11}^{e(est)}}{(\sigma'_{11} - (3/2)\rho_{11}^c - \bar{\sigma}_c)}. \quad (15)$$

Для участка $\chi_c > \chi_c^{(2)}$

$$\lambda_c^{III} = \frac{\lambda_c^{II}}{1 - \omega}, \quad (16)$$

где ω – поврежденность материала.

Алгоритм связи уравнений термопластичности (1)–(10) с уравнениями термоползучести (11)–(16) заключается в том, что напряжения, деформации пластичности и ползучести находятся из уравнений термоползучести методом Рунге – Кутты. Проводится коррекция девиатора напряжений с определением напряжений из уравнений термопластичности при средней скорости деформаций ползучести на новом временном интервале.

Накопление повреждений

Процесс накопления повреждений задается в виде [13–16]:

$$\dot{\omega} = f_1(\beta) f_2(\omega) f_3(W_0) f_4(\Theta) \dot{W}_0, \quad W_0 = \rho_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^n, \quad \dot{\epsilon}_{ij}^n = \dot{\epsilon}_{ij}^p + \dot{\epsilon}_{ij}^c, \quad (17)$$

где функция $f_1(\beta)$ учитывает «объемность» напряженного состояния, а $f_2(\omega)$ – уровень накопленной поврежденности; $f_3(W_0)$ – значение относительной «опасной» энергии W_0 , идущей на образование микродефектов; $f_4(\Theta)$ – функция, учитывающая влияние параметров траектории деформирования:

$$f_1(\beta) = \exp k\beta; \quad (18)$$

$$f_2(\omega) = \begin{cases} 0 & \text{при } W_0 \leq W_a, \\ \omega^{1/3}(1-\omega)^{2/3} & \text{при } W_0 > W_a \wedge \omega \leq 1/3, \\ \sqrt[3]{16/9}\omega^{-1/3}(1-\omega)^{-2/3} & \text{при } W_0 > W_a \wedge \omega > 1/3; \end{cases} \quad (19)$$

$$f_3(W_0) = \frac{W_0 - W_a}{W_f - W_a}, \quad W_f = W_{pf}^{cyc} \frac{\dot{\chi}_p^{cyc}}{\dot{\chi}} + W_{cf}^{cyc} \frac{\dot{\chi}_c^{cyc}}{\dot{\chi}} + W_{pf}^{mon} \frac{\dot{\chi}_p^{mon}}{\dot{\chi}} + W_{cf}^{cyc} \frac{\dot{\chi}_c^{mon}}{\dot{\chi}}, \quad (20)$$

где $W_a, W_{pf}^{cyc, mon}(T)$ и $W_{cf}^{cyc, mon}(T)$ – параметры материала;

$$f_4(\Theta) = (1 - \cos^2 \Theta)\beta + \cos^2 \Theta. \quad (21)$$

Прочность

В качестве критерия разрушения выбираем условие [8]:

$$\omega = \omega_f \leq 1. \quad (22)$$

В модели поврежденной среды ее составляющие термовязкопластичность, накопление повреждений и прочность связываются путем введения эффективных напряжений [7, 8]:

$$\tilde{\sigma}'_{ij} = F_1(\omega)\sigma'_{ij} = \frac{G}{\tilde{G}}\sigma'_{ij} = \frac{\sigma'_{ij}}{(1-\omega)[1-\omega(6K+12G)/(9K+8G)]}, \quad (23)$$

$$\tilde{\sigma} = F_2(\omega)\sigma = \frac{K}{\tilde{K}}\sigma = \frac{\sigma}{4G(1-\omega)/(4G+3K\omega)}, \quad \tilde{\rho}_{ij} = F_1(\omega)\rho_{ij}, \quad (24)$$

где \tilde{G}, \tilde{K} – эффективные модули упругости, определяемые по формулам Маккензи [17].

2. Результаты исследований

Безаварийность работы газотурбинных двигателей и установок обеспечивают новые жаропрочные материалы, системы охлаждения и средства защиты деталей [18–20]. С помощью таких систем и средств можно добиться увеличения термоциклической долговечности более чем в 5 раз. Применяемые в настоящее время жаропрочные сплавы работают при предельно допустимых температурах.

В [20] представлены результаты экспериментально-теоретических исследований по влиянию угла наклона охлаждающих каналов моделей жаровых труб камер сгорания на их термоциклическую долговечность. Опытные данные дают оценки влияния углов наклона и параметров каналов на термоциклическую долговечность моделей жаровых труб камер сгорания газотурбинных двигателей.

Рассмотрим полые образцы коробчатой формы из сплава ВЖ-159. На верхнем торце образца установлена заглушка. Образование трещины наблюдалось через бинокулярный микроскоп, тепловизор температурного поля перфорированной стенки образца применялся для контроля. Толщина стенки 1 мм. Вдоль оси с интервалом 5 мм проделаны ряды отверстий диаметром 1, 1,5, 2 см (рис. 2а). На одной стороне

отверстия выполнены перпендикулярно поверхности ($\gamma = 90^\circ$), а на другой – под углом $\gamma = 35^\circ$ (рис. 2б).

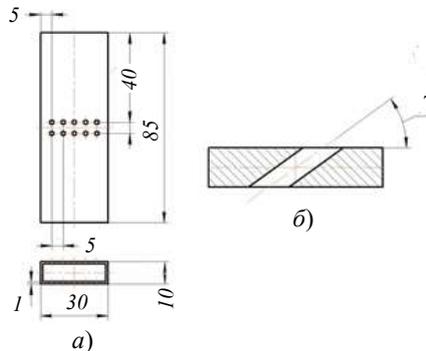


Рис. 2. Лабораторный образец

Термоциклический трапецидальный нагрев задан доведением температуры поверхности детали от 350 до 900 °С. Время нагрева составило 5 с. При температуре 900 °С полые образцы выдерживались в течение 7 с. Охлаждающий воздух подавался внутрь образца с постоянным расходом 12 л/с.

В таблице 1 приведены результаты опытов с различным углом наклона охлаждающих каналов (диаметр отверстия 1 мм).

Таблица 1

Термоциклическая долговечность

Угол наклона оси каналов к поверхности γ , град.	Диаметр, мм	Число циклов до разрушения N						Среднее значение, N_{cp}
35	1	174	194	200	117	292	156	189
90	1	851	950	983	576	1431	765	926

Исследование показало, что температурный градиент по толщине стенки образца с нормальными каналами ниже, чем у образца с каналами под углом, и разница температур составила 250 °С. Результаты опытов свидетельствуют о более чем 5-кратном уменьшении ресурсных характеристик моделей труб с каналами под углом 35° по сравнению с каналами под углом 90°. При этом влияние величины отверстия для подачи охлаждающего воздуха при расчетных диаметрах 1, 1,5 и 2 мм незначительно (их влияние на термоциклический ресурс не более 20%).

Численное решение представляет собой последовательность решения электромагнитной задачи, задачи теплопроводности и расчет ресурсных характеристик в условиях многоосного напряженного состояния.

Из решения уравнения Максвелла найдено нестационарное распределение удельной мощности нагрева по толщине трубы.

Расчет нестационарного теплового поля для охлаждаемого изделия проводился с использованием программного комплекса ANSYS (лицензия Customer 244793). В расчетах температура и коэффициент теплоотдачи к окружающей среде принимались соответственно 20 °С и 25 Вт/(м²·К); коэффициент теплоотдачи внутри трубы – 1900 Вт/(м²·К); удельная мощность нагрева – $9 \cdot 10^5$ Вт/м²; размах температуры нагрева поверхности изделия – от 350 до 900 °С.

Решение проводилось в связанной постановке. Численный анализ показал, что температурный градиент в окрестности нормальных каналов меньше, чем вблизи

наклонных. Температурное поле неоднородно и разница температур по толщине для нормальных каналов составляет 164,5 °С (рис. 3а), а для наклонных каналов – 264,3 °С (рис. 3б). Результат подтвержден опытными данными.

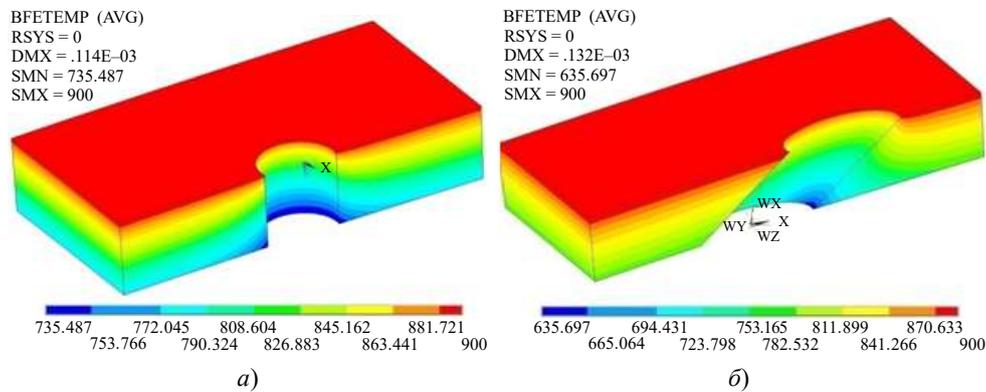


Рис. 3. Температурные поля в окрестности нормальных (а) и наклонных (б) каналов

Оценка термоциклической долговечности при различных углах проведена численно с использованием найденных температурных полей [7–10].

Кинетика напряженно-деформированного состояния (НДС) в нелинейной постановке определялась в программном пакете ANSYS. Распределения полей интенсивности напряжений и интенсивности неупругих деформаций фрагмента модели трубы с перфорированными отверстиями в окрестности одного из каналов для второго цикла термоциклического напряжения представлены на рис. 4, 5 для нормальных (а) и наклонных (б) каналов. Наибольшее значение интенсивности напряжений наблюдается внутри стенки трубы, в то время как максимальное значение интенсивности неупругих деформаций возникает в окрестности наружной разогретой кромки поверхности канала. Отмечается [21], что именно в этой области наиболее интенсивно проходят деградационные процессы [20]. В этой зоне сформирована микроскопическая трещина [20].

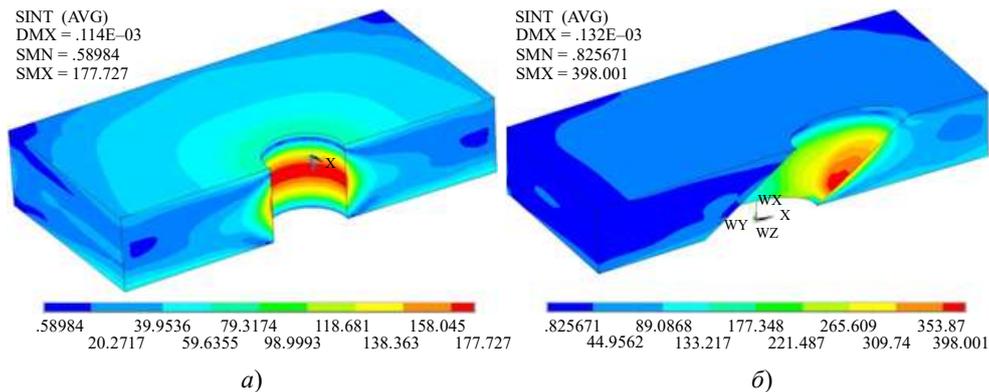


Рис. 4. Распределение полей интенсивности напряжений фрагмента модели трубы в окрестности одного из каналов

Исследование позволяет утверждать о зависимости процесса термической усталости от влияния физико-механических и прочностных свойств жаропрочного сплава

от температуры и процесса «заневоливания» тонкой наружной (разогретой) поверхности канала более жесткой «холодной» частью стенки.

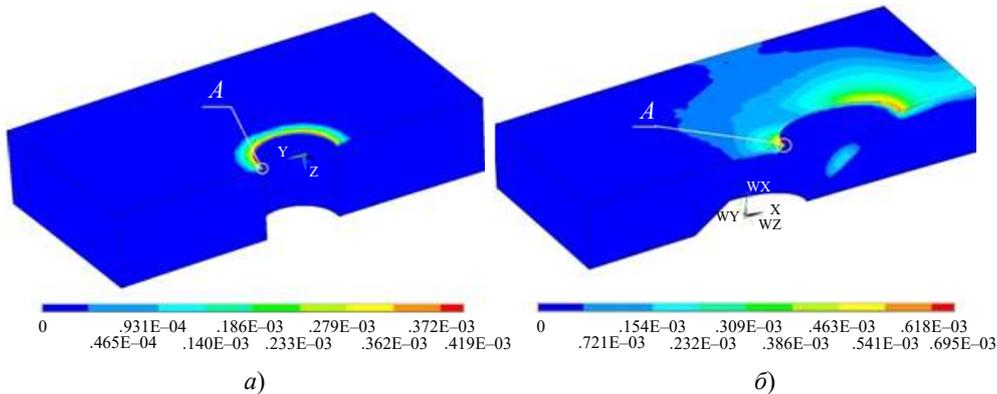


Рис. 5. Распределение полей интенсивности неупругих деформаций фрагмента модели трубы в окрестности одного из каналов

В наиболее нагруженной зоне выделим точку A (см. рис. 5). В окрестности точки A реализуется напряженное состояние, близкое к плоскому напряженному состоянию. В точке A получены зависимости температуры и компонент тензора деформации от числа шагов нагружения для двух углов наклона охлаждающих каналов. Эти результаты использованы для оценки термоциклической долговечности трубы с применением программного средства EXPMODEL.

На рис. 6, 7 для точки A приведены петли циклического гистерезиса, рассчитанные с использованием программного средства EXPMODEL [8]: $\sigma_{11} \sim e_{11}$ (рис. 6), $\sigma_{22} \sim e_{22}$ (рис. 7). На рис. 8 для точки A показаны траектории нагружения ($\sigma_{11} \sim e_{11}$). Полученные данные (см. рис. 6–8) показывают наличие вращения главных площадок тензоров напряжений и деформаций, а также несоосность тензоров напряжений, полных и неупругих деформаций. Кроме того видно, что учет образования деформаций ползучести (даже незначительных) оказывает влияние на форму петли циклического гистерезиса [21].

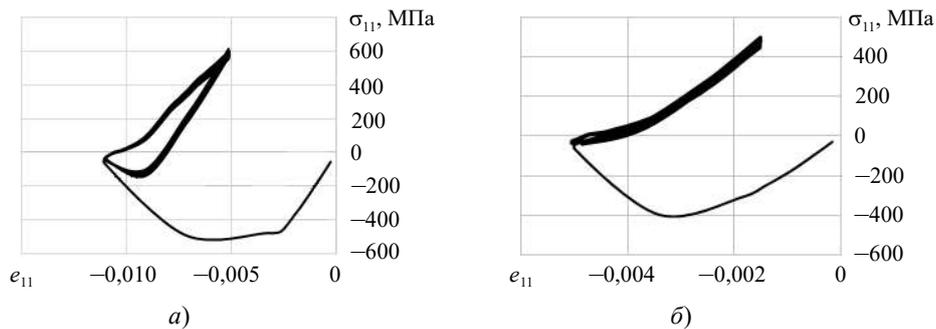


Рис. 6. Петли циклического гистерезиса $\sigma_{11} \sim e_{11}$: а) $\gamma = 35^\circ$, б) $\gamma = 90^\circ$

Интегрирование эволюционного уравнения накопления усталостных повреждений показывает влияние угла охлаждающих каналов на термоциклическую долговечность (точка A на рис. 5). Зависимости величин повреждения от числа циклов нагружения изображены на рис. 9. Опытные данные из таблицы 1 и расчетные данные из рис. 9 показывают необходимую инженерную точность согласования результатов.

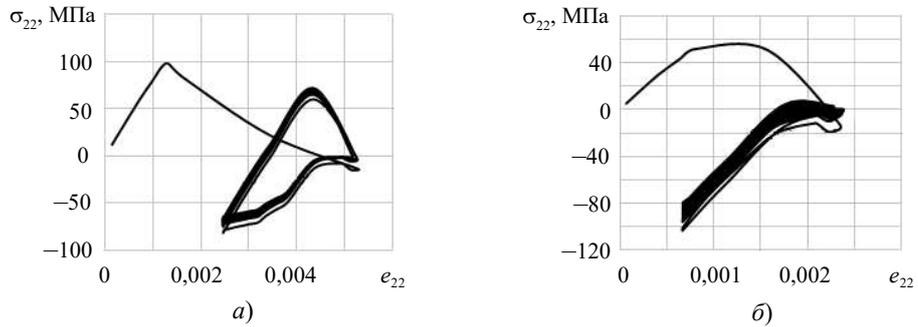


Рис. 7. Петли циклического гистерезиса $\sigma_{22} \sim e_{22}$: а) $\gamma = 35^\circ$, б) $\gamma = 90^\circ$

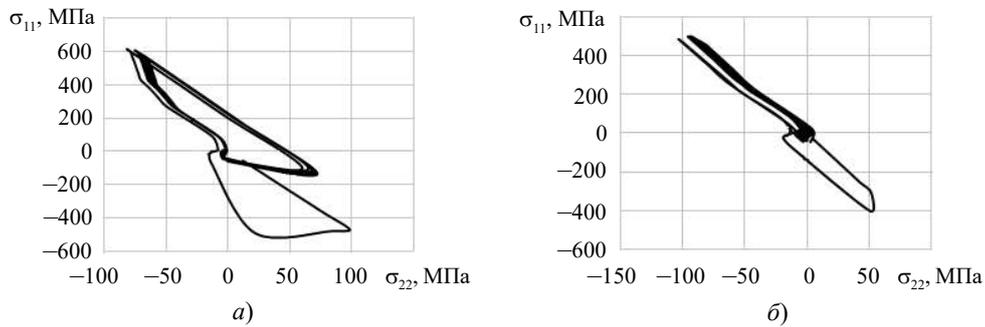


Рис. 8. Траектории нагружения $\sigma_{11} \sim \sigma_{22}$: а) $\gamma = 35^\circ$, б) $\gamma = 90^\circ$

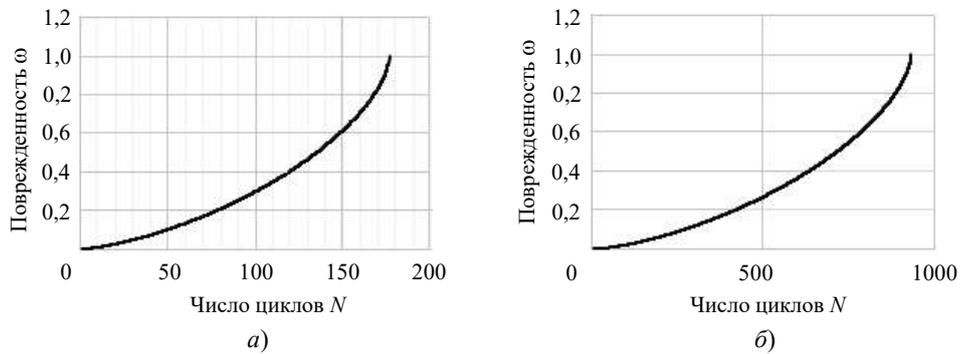


Рис. 9. Зависимости величин поврежденности ω от числа циклов нагружения N для двух углов наклона перфорированных отверстий: а) $\gamma = 35^\circ$, б) $\gamma = 90^\circ$

Таким образом, с использованием разработанного программного средства EXPMODEL и методологии, обеспечивающей сквозное моделирование (поэтапный расчет теплового состояния трехмерной нелинейной задачи расчета НДС и дальнейшего использования полученных результатов в качестве условия неизотермического нагружения опасной зоны изделия), получена оценка термоциклической долговечности моделей жаровых труб камер сгорания современных газотурбинных двигателей при термопульсациях. Результаты расчетов подтверждают правильность подхода к оценке термоциклической долговечности материалов и конструкций и адекватность развитой модели поврежденной среды.

Заключение

Дана оценка достоверности модифицированной модели поврежденной среды при деградации материала по механизму термической усталости. В качестве примера проведен расчет моделей жаровых труб камер сгорания газотурбинных двигателей. Продемонстрирована проектная возможность влияния на ресурсные характеристики.

Расчетным путем показано, что снижение термоциклической усталостной долговечности связано с уменьшением угла наклона перфорированных поверхностей жаровых труб камер сгорания, что подтверждается опытными данными.

Результаты исследований подтвердили достоверность моделирования процессов сложного термоциклического деформирования и оценки термической усталости материалов и конструкций в условиях многоосного напряженного состояния.

Список литературы

1. Коллинз Дж. *Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение*. М.: Мир, 1984. 624 с.
2. Митенков А.М., Кайдалов В.Б., Коротких Ю.Г. и др. *Методы обоснования ресурса ЯЭУ*. М.: Машиностроение, 2007. 445 с.
3. Гомюк, Бью Куок. Расчет долговечности коррозионностойкой стали 304 в условиях взаимодействия усталости и ползучести с использованием теории непрерывного повреждения. *Труды Америк. об-ва инж.-мех. Серия D. Теорет. основы инж. расчетов*. 1986. Т. 108. №3. С. 111–136.
4. Замрик С., Дэвис Д. Применение метода исчерпания пластичности для усталости при одноосном нагружении – оценка повреждения при ползучести для нержавеющей стали 316. *Современное машиностроение. Сер. Б*. 1991. №8. С. 16–24.
5. Замрик С. Расчет повреждений, обусловленных взаимным влиянием ползучести и усталости нержавеющей стали 316 при осевом нагружении. *Современное машиностроение. Сер. Е*. 1990. №7. С. 1–16.
6. Tianyu Zhang, Xiaowei Wang, Wei Zhang, Tasnim Hassan, Jianming Gong. Fatigue-creep interaction of P92 steel and modified constitutive modelling for simulation of the responses. *Metals*. 2020. Vol. 10. No 3. P. 307–318. DOI: 10.3390/met10030307.
7. Волков И.А., Коротких Ю.Г. *Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями*. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
8. Волков И.А., Игумнов Л.А. *Введение в континуальную механику поврежденной среды*. М.: Физматлит, 2017. 304 с.
9. Igumnov L.A., Volkov I.A., Delyizola F., Litvinchuk S.Yu., Eremeev V.A. A continual model of a damaged medium used for analyzing fatigue life of polycrystalline structural alloys under thermal-mechanical loading. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2020. Vol. 32. P. 229–245. DOI:10.1007/s00161-019-00795-x.
10. Volkov I.A., Igumnov L.A., Shishulin D.N., Boev E.V. Modeling of non-stationary creep processes under multiple loading conditions by taking into account damage accumulation in a structural material. *Mechanics of Solids*. 2022. Vol. 57. No 2. P. 223–231. DOI: 10.3103/S0025654422020224.
11. Митенков Ф.М., Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г. и др. *Прикладная теория пластичности*. М.: Физматлит, 2015. 284 с.
12. Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г. *Прикладная теория вязкопластичности*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2015. 318 с.
13. Lemaître J., Chaboche J. Aspect phenomenologique de la rupture par enclommagement. *Journal de Mécanique Appliqué*. 1978. Vol. 2. No 3. P. 317–364.
14. Hulford G.R. Low cycle thermal fatigue. *Mechanics and Mathematical Methods. F Thermal stress II*. Chapter 6. Elsevier Science Publishers B.V., 1987. P. 329–428.
15. Beaver P.W. *Biaxial Fatigue and Fracture of Metals: a Review Metals Forum*. 1985. Vol. 8. P. 14–29.

16. Chaboche J.L. Continuous damage mechanics a tool to describe phenomena before crack initiation. *Nuclear Engineering Design*. 1981. Vol. 64. Iss. 2. P. 233–247. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(81\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0029-5493(81)90007-8).

17. MacKenzie J.K. The elastic constants of a solids containing spherical holes. *Proceedings of the Physical Society*. 1950. B63. P. 2–11. <http://dx.doi.org/10.1088/0370-1301/63/1/302>.

18. Бычков Н.Г., Лепёшкин А.Р., Першин А.В., Рекин А.Д., Лукаш В.П. Методика испытаний и оценка термоциклической долговечности моделей жаровых труб камер сгорания ГТД с защитными покрытиями с использованием высокочастотного индукционного нагрева *Авиационная техника и технология*. 2004. №8(16). С. 158–162.

19. Лепёшкин А.Р., Бычков Н.Г., Першин А.В. Теплофизические измерения при термоциклировании лопаток газотурбинных двигателей с керамическими покрытиями. *Теплофизика высоких температур*. 2010. Т. 48. Вып. 5. С. 734–740.

20. Бычков Н.Г., Лепёшкин А.Р., Першин А.В., Рекин А.Д., Лукаш В.П. Исследование термоциклической долговечности деталей с различными углами наклона охлаждаемых каналов. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. №10(67). С. 113–117.

21. Волков И.А., Игумнов Л.А., Шишулин Д.Н., Тарасов И.С., Гусева М.А. Численный анализ термоциклической долговечности моделей жаровых труб с различными углами наклона охлаждающих каналов. *Проблемы прочности и пластичности*. 2017. №79 (2). С. 220–233.

References

1. Collins J. *Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention*. New York. John Wiley & Sons. 1981. 672 p.

2. Mitenkov F.M., Kaydalov V.B., Korotkikh Yu.G. et al. *Metody obosnovaniya resursa YaEU [Methods of Substantiating the Resource of Nuclear Power Plants]*. Moscow. Mashinostroenie Publ. 2007. 445 p. (In Russian).

3. Gomyuk, Beau-Quoc T. Raschet dolgovechnosti korrozionnostoykoy stali 304 v usloviyakh vzaimodeystviya ustalosti i polzuchesti s ispolzovaniem teorii nepreryvnogo povrezhdeniya [Calculation durability stainless steel 304 in interaction of fatigue and creep by using the theory of continuous damage]. *Trudy Amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov. Seriya Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov [Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. Series D]*. 1986. Vol. 108. No 3. P. 111–136 (In Russian).

4. Zamrik S.Y., Davis D.C. A ductility exhaustion approach for axial fatigue – creep damage assessment using type 316 stainless steel. *Journal of Pressure Vessel Technology. Transactions of the ASME*. 1991. Vol. 113. Iss. 2. P. 180–186. DOI: 10.1115/1.2928745.

5. Zamrik S.Y. An interpretation of axial creep-fatigue damage interaction in type 316 stainless steel. *Journal of Pressure Vessel Technology. Transactions of the ASME*. 1990. Vol. 112. Iss. 1. P. 4–19. <https://doi.org/10.1115/1.2928580>

6. Tianyu Zhang, Xiaowei Wang, Wei Zhang, Tasnim Hassan, Jianming Gong. Fatigue-creep interaction of P92 steel and modified constitutive modelling for simulation of the responses. *Metals*. 2020. Vol. 10. No 3. P. 307–318. DOI: 10.3390/met10030307.

7. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. *Uravneniya sostoyaniya vyzkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami [Equations of State of Viscoelastic Plastic Media with Damage]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2008. 424 p. (In Russian).

8. Volkov I.A., Igumnov L.A. *Vvedenie v kontinualnuyu mekhaniku povrezhdennoy sredy [Introduction to the Continuum Mechanics of a Damaged Medium]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2017. 304 p. (In Russian).

9. Igumnov L.A., Volkov I.A., Delyizola F., Litvinchuk S.Yu., Ereemeev V.A. A continual model of a damaged medium used for analyzing fatigue life of polycrystalline structural alloys under thermal-mechanical loading. *Contin. Mech. Thermodyn*. 2020. Vol. 32. P. 229–245. DOI:10.1007/s00161-019-00795-x.

10. Volkov I.A., Igumnov L.A., Shishulin D.N., Boev E.V. Modeling of non-stationary creep processes under multiple loading conditions by taking into account damage accumulation in a structural material. *Mechanics of Solids*. 2022. Vol. 57. No 2. P. 223–231. DOI: 10.3103/S0025654422020224.

11. Mitenkov F.M., Volkov I.A., Igumnov L.A. et al. *Prikladnaya teoriya plastichnosti* [*Applied Theory of Plasticity*]. Moscow. Fizmatlit Publ. 2015. 284 p. (In Russian).
12. Volkov I.A., Igumnov L.A., Korotkikh Yu.G. *Prikladnaya teoriya vyazkoplastichnosti* [*Applied Theory of Viscoplasticity*]. Nizhny Novgorod. UNN Publ. 2015. 318 p. (In Russian).
13. Lemaitre J., Chaboche J. Aspect phenomenologique de la rupture par enclommagement. *Journal de Mecanique Appliqué*. 1978. Vol. 2. No 3. P. 317–364.
14. Hulford G.R. Low cycle thermal fatigue. *Mechanics and Mathematical Methods*. F Thermal stress II. Chapter 6. Elsevier Science Publishers B.V. 1987. P. 329–428.
15. Beaver P.W. *Biaxial Fatigue and Fracture of Metals: a Review Metals Forum*. 1985. Vol. 8. P. 14–29.
16. Chaboche J.L. Continuous damage mechanics a tool to describe phenomena before crack initiation. *Engineering Design*. 1981. Vol. 64. P. 233–247. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(81\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0029-5493(81)90007-8).
17. MacKenzie J.K. The elastic constants of a solids containing spherical holes. *Proc. Phys. Soc.* 1950. B63, P. 2–11. <http://dx.doi.org/10.1088/0370-1301/63/1/302>.
18. Bychkov N.G., Lepeshkin A.P., Pershin A.V., Rekin A.D., Lukash V.P. Metodika ispytaniy i otsenka termotsiklicheskoy dolgovechnosti modeley zharovykh trub kamer sgoraniya GTD s zaschitnymi pokrytiyami s ispolzovaniem vysokochastotnogo induktsionnogo nagreva [Test procedure and evaluation of thermocyclic longevity of the models of the flame tubes of combustion chambers of GTE with protective coatings using high-frequency induction heating]. *Aviatsionnaya tekhnika i tekhnologiya* [*Aviation Engineering and Technology*]. 2004. No 8(16). P. 158–162 (In Russian).
19. Lepeshkin A.R., Bychkov N.G., Pershin A.V. Thermo-physical measurements during thermal cycling of gas turbine engine blades with ceramic coatings. *High Temperature*. 2010. Vol. 48. Iss. 5. P. 699–705. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X10050111>.
20. Bychkov N.G., Lepeshkin A.P., Pershin A.V., Rekin A.D., Lukash V.P. Issledovanie termotsiklicheskoy dolgovechnosti detaley s razlichnymi uglami naklona okhlazhdaemykh kanalov [Investigation of thermocyclic durability of parts with different angles of slope of cooled channels]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [*Aerospace Engineering and Technology*]. 2009. No 10(67). P. 113–117 (In Russian).
21. Volkov I.A., Igumnov L.A., Shishulin D.N., Tarasov I.S., Guseva M.A. Chislennyy analiz termotsiklicheskoy dolgovechnosti modeley zharovykh trub s razlichnymi uglami naklona okhlazhdayuschikh kanalov [Numerical analysis of thermal-cyclic life of models of the flue tube with various inclinations of the cooling channels]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [*Problems of Strength and Plasticity*]. 2017. Vol. 79. No 2. P. 220–233.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE DURABILITY OF STRUCTURAL ELEMENTS UNDER THERMAL CYCLIC LOADING*

Volkov I.A., Igumnov L.A., Kostyukov V.E., Prilutsky M.Kh.

*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

pmptmvgavt@yandex.ru

Received by the Editor 2023/09/28

The methodological aspects of assessing the service life of new equipment (elements of gas turbine engines), the operating modes of which lead to non-stationary thermomechanical loads, are considered. The associated thermoviscoplastic processes of deformation and damage states of the degradable continuum are modeled. A model of thermal fatigue in polycrystalline structural alloys for arbitrary complex deformation trajectories is described, consisting of relationships that determine

*The research was supported by the Russian Science Foundation (project No 22-19-00138).

cyclic thermoviscoplastic deformation; evolutionary equations for damage accumulation and strength criteria for damaged material. Kinetic equations take into account the effects of nonlinear damage accumulation, are based on the introduction of a scalar damage parameter, and are based on energy principles. The related formulation of the kinetic equations for damage accumulation under low-cycle fatigue and long-term strength describes the nonlinear nature of damage accumulation. The criterion for the strength of damaged material is the condition that the damage reaches a critical value.

Using the developed original methodological, algorithmic and software that allows for end-to-end numerical modeling of thermal cyclic processes, the problem of assessing the thermal cyclic durability of models of elements and components of gas turbine engines during thermal pulsations has been solved. The results of an analysis of the influence of the angle of inclination of cooling channels in a model of combustion chamber pipes on the thermal cyclic durability are presented. The issues of the influence of complex thermal cyclic deformation, accumulation of fatigue damage, plastic deformations and creep deformations on the thermal fatigue of structural elements are considered. A comparative analysis of numerical results with experimental data was carried out. The efficiency of the model for describing the process of thermal fatigue of materials and structures under multiaxial disproportionate paths of thermal cyclic loading has been confirmed.

Keywords: thermocyclic durability, damaged environment, viscoplasticity, complex deformation, macroscopic crack, strength, fracture.