



Научная статья
УДК 539.3

Методология и особенности вычислительного эксперимента по оценке ресурса ответственных инженерных объектов

И. А. Волков, Л. А. Игумнов[✉], В. Е. Костюков, М. Х. Прилуцкий

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского, Россия, 603950, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, д. 23

Волков Иван Андреевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории моделирования физико-механических процессов Центра суперкомпьютерного моделирования Научно-исследовательского института механики, pmptmvgavt@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1176-4906>, AuthorID: 812910

Игумнов Леонид Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории моделирования физико-механических процессов Центра суперкомпьютерного моделирования Научно-исследовательского института механики, igumnov@mech.unn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3035-0119>, AuthorID: 6317

Костюков Валентин Ефимович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информатики и автоматизации научных исследований Института информационных технологий, математики и механики, staff@vniief.ru, AuthorID: 507003

Прилуцкий Михаил Хаимович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики и автоматизации научных исследований Института информационных технологий, математики и механики, pril@iani.unn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7694-3916>, AuthorID: 6877

Аннотация. Рассматривается проблема получения оценок прочностных и ресурсных характеристик объектов критической инженерной инфраструктуры при эксплуатационных многопараметрических нестационарных термомеханических воздействиях. Выделены базовые деградационные механизмы в конструкционных материалах (металлах, сплавах) при данных воздействиях. Обосновывается методология оценки ресурса ответственных инженерных объектов на основе сквозного моделирования всего жизненного цикла объекта. Сквозное моделирование образует набор вычислительных экспериментов разного уровня сложности, каждый из которых имеет свои характерные признаки и семантику. С позиции механики деградируемого континуума развита математическая модель поврежденной среды, в которой процессы термопластичности и накопления повреждений порождаются термической усталостью. Модель описывает эффекты циклического термопластического деформирования, кинетику накопления повреждений, условия макроскопического разрушения материала. В модели постулируется представление поверхности текучести и принцип градиентальности вектора скорости пластических деформаций в точке нагружения. Вариант уравнений термопластичности описывает основные эффекты при пропорциональных и непропорциональных режимах. Модель термопластичности построена как система «вложенных» моделей и содержит формы уравнений теории пластического течения при малых деформациях: различные варианты изотропного упрочнения (идеально пластический материал с постоянной поверхностью текучести, линейное изотропное упрочнение, вариант изотропного нелинейного упрочнения), различные случаи кинематического упрочнения (линейное кинематическое упрочнение, случай чисто нелинейного кинематического упрочнения) и общий случай трансляционно-изотропного упрочнения. Кинетика накопления усталостных повреждений описывается путем введения скалярного параметра поврежденности и на базе энергетических принципов учета основных эффектов процесса накопления повреждений для произвольных сложных режимов нагружения. Условие достижения критического значения поврежденности используется в качестве критерия макроскопического разрушения.



Взаимосвязь составных частей модели осуществляется за счет введения эффективных напряжений. В работе представлен численный анализ термической усталостной долговечности компактного образца с концентраторами напряжений, имитирующего работу деталей в сопловой коробке паровой турбины атомной электростанции. В ходе анализа изучены характерные особенности термической усталости в деталях энергооборудования. Показано, что технология сквозного моделирования может эффективно применяться для оценки ресурсных характеристик деталей энергооборудования при эксплуатационных режимах нагружения.

Ключевые слова: численное моделирование, вычислительный эксперимент, модель поврежденной среды, напряженно-деформированное состояние, термоциклическая усталость, поврежденность, разрушение, ресурс

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00138).

Для цитирования: Волков И. А., Игумнов Л. А., Костюков В. Е., Прилуцкий М. Х. Методология и особенности вычислительного эксперимента по оценке ресурса ответственных инженерных объектов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 35–48. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2024-24-1-35-48>, EDN: AVPFBT
Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Methodology and features of a computational experiment to assess the resource of responsible engineering facilities

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

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 23 Prospekt Gagarina (Gagarin Avenue), Nizhny Novgorod 603950, Russia

Ivan A. Volkov, pmptmvgavt@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1176-4906>, AuthorID: 812910

Leonid A. Igumnov, igumnov@mech.unn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3035-0119>, AuthorID: 6317

Valentin E. Kostyukov, staff@vniief.ru, AuthorID: 507003

Mikhail Kh. Prilutsky, pril@iani.unn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7694-3916>, AuthorID: 6877

Abstract. The problem of obtaining estimates of the strength and resource characteristics of critical engineering infrastructure facilities under operational multiparametric nonstationary thermomechanical impacts is considered. The basic degradation mechanisms in structural materials (metals, alloys) under these influences are identified. The methodology of resource assessment of responsible engineering facilities based on end-to-end modeling of the entire life cycle of the object is substantiated. End-to-end modeling forms a set of computational experiments of different levels of complexity, each of which has its own characteristic features and semantics. From the perspective of the mechanics of the degraded continuum, a mathematical model of the damaged medium has been developed, in which the processes of thermoplasticity and damage accumulation are generated by thermal fatigue. The model describes the effects of cyclic thermoplastic deformation; kinetics of damage accumulation; conditions of macroscopic destruction of the material. The model postulates the representation of the yield surface and the principle of gradiency of the velocity vector of plastic deformations at the loading point. A variant of the thermoplasticity equations describes the main effects in proportional and disproportionate modes. The thermoplasticity model is constructed as a system of “nested” models and contains the forms of equations of the theory of plastic flow under small deformations: various variants of isotropic hardening (ideally plastic material with a constant flow surface, linear isotropic hardening, variant of isotropic nonlinear hardening), various cases of kinematic hardening (linear kinematic hardening, the case of purely nonlinear kinematic hardening) and the general case of translational isotropic hardening. The kinetics of fatigue damage accumulation is described by introducing a scalar damage parameter and based on the energy principles of taking into account the



main effects of the damage accumulation process for arbitrary complex loading modes. The condition of reaching the critical damage value is used as a criterion for macroscopic destruction. The relationship between the components of the model is carried out by introducing effective stresses. The paper presents a numerical analysis of the thermal fatigue life of a compact sample with stress concentrators simulating the operation of parts in the nozzle box of a steam turbine of a nuclear power plant. During the analysis, the characteristic features of thermal fatigue in the details of power equipment were studied. It is shown that the end-to-end modeling technology can be effectively used to assess the resource characteristics of power equipment parts under operational loading conditions.

Keywords: numerical modeling, computational experiment, model of damaged medium, stress-strain state, thermocyclic fatigue, damage, destruction, resource

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-19-00138).

For citation: Volkov I. A., Igumnov L. A., Kostyukov V. E., Prilutsky M. Kh. Methodology and features of a computational experiment to assess the resource of responsible engineering facilities. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 35–48 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2024-24-1-35-48>, EDN: AVPFBT

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Рассматриваются объекты критической инфраструктуры при длительных сроках эксплуатации, такие как ядерные энергетические установки, нефтехимическое оборудование, резервуары газообразных и сжиженных химических продуктов, авиационные газотурбинные двигатели и установки нового поколения и др. Предполагается, что время работы объекта измеряется несколькими десятками лет. Условия эксплуатации объекта характеризуются нестационарными термомеханическими воздействиями. Длительная эксплуатация ответственных инженерных объектов (ОИО) приводит к накоплению повреждений, падению исходных прочностных свойств материала и образованию, развитию трещин. Безопасная эксплуатация ОИО и обоснование сроков их службы обеспечивается контрольно-надзорными мероприятиями за процессом накопления повреждений в опасных зонах, оценкой выработанного ресурса материала таких зон, а также прогнозом работы материала до предельных состояний (остаточный ресурс) [1–6]. Исчерпание ресурса определяется во многих случаях такими деградационными механизмами, как много- или малоцикловая усталость, нестационарная ползучесть, коррозионные повреждения, фреттинг-износ и фреттинг-усталость, радиационное повреждение и др. Необратимые структурные изменения определяют процесс образования макроскопической трещины и долговечность материала.

Общие формулировки количественной связи повреждения с изменением измеряемых физически параметров — магнитная проницаемость, электросопротивление, твердость, модули упругости и т. д. — для проведения ресурсных расчетов в настоящее время практически не используются (в предпринятых попытках в настоящее время количественно связать изменение физического параметра с повреждением отсутствуют результаты, которые могли бы использоваться в практических расчетах). Невозможность их применения актуализирует создание моделей поврежденной среды. Мера поврежденности материала как внутренняя переменная состояния определяется возможностями натурального эксперимента и берется в виде скалярного параметра ω [2–4, 7–14], изменяющегося от начального состояния ω_0 , соответствующего неповрежденному материалу, до предельной величины ω_f , соответствующей макроразрушению. Предполагается, что процесс накопления повреждений зависит от истории напряженно-деформированного состояния (НДС).

Содержание методологии компьютерного моделирования составляют: определение зависящих от времени граничных и начальных условий; определение квазистатического НДС на основе дифференциальной теории термопластичности при учете истории и эффектов



сложного нагружения; описание процесса накопления усталостных повреждений и расчет долговечности; формулировка предельных состояний.

Расширенная задача расчета ресурса формулируется за счет варибельности постановок задач и применяемых численных методов. Это формирует пространство варибельности задачи и требует разработки новых архитектур многофункциональных прикладных пакетов программ [15–17]. Совокупность программ расчетного ядра опирается на методическое обеспечение конечной или граничной элементной схем.

При решении задач модельной и параметрической идентификации в описании процессов термоциклического разрушения применяется экспериментально-расчетный подход, в рамках которого требуются оригинальные программно-аппаратные разработки, чьи возможности не достижимы такими многофункциональными инженерными пакетами программ, как «Логос», «ANSYS», «Abaqus» и др.

Для оценки остаточного ресурса ОИО требуются: гарантированная точность расчета НДС с учетом нелинейности поведения материала (пластичность, поврежденность, ползучесть и т. д.); анализ цифрового двойника узла на всем временном интервале стационарирования параметров термоциклического деформирования, а в отдельных случаях получение расчетных состояний для всего жизненного цикла выделенного узла. Численный анализ, как правило, необходим для потенциально опасных зон ОИО. К таким зонам традиционно относятся сварные швы, места смены типа граничных условий и т. п. В таких местах возникают концентраторы напряжений, и построение соответствующих оценок требует высокой точности расчета. Заданная точность прочностных оценок исследователями достигается за счет сквозного моделирования, когда исходный анализируемый процесс представляется в виде связанных процессов меньшего уровня сложности: трехмерный упругий расчет, двумерное упругопластическое моделирование отдельных конструктивных элементов, определение ресурсных характеристик материала опасных зон (расчет в «точке») и т. п. Каждый такой подпроцесс имеет свое целеполагание. Данные, полученные по упругому НДС, в трехмерной постановке дадут общее представление о деформировании исследуемого объекта. По результатам такого расчета даются оценки важных расчетных показателей создаваемых конечномерных моделей, таких как выявление критических мест для их построения и выбор локальных аппроксимаций, с точки зрения оценки долговечности. Расчет НДС в двумерной постановке (плоской или осесимметричной) при нелинейном характере поведения материала позволяет численно детализировать процесс деформирования и накопления повреждений в выделенных зонах. Подход не требует построения цифрового двойника всей конструкции. Локация конструкционного узла определяется граничными условиями, степенями свободы и т. п. Такой расчет достаточен для получения ресурсных характеристик материала в условиях эксплуатационного нагружения.

Ресурсные характеристики конструкции определяются, как правило, с помощью расчета ресурса опасных зон конструктивных элементов в эксплуатационных условиях нагружения (расчет ресурсных характеристик в «точке»).

Развитие рассматриваемой в работе модели поврежденной среды (МПС) можно найти в [3, 4, 12–14].

В работе представленный подход используется для численного анализа термической усталости детали с концентраторами, имитирующими работу деталей сопловой коробки паровой турбины атомной электростанции (АЭС) с использованием технологии сквозного моделирования с применением развитого программного средства «EXPMODEL» [3, 4], созданного для расчетного моделирования неизотермического вязкопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных сплавах при нерегулярном нестационарном термомеханическом нагружении.

1. Модель поврежденной среды для оценки усталостной долговечности при термоциклическом нагружении

Модель поврежденной среды, предложенная в [1, 3] и развитая в [1, 4].



1. *Определяющие соотношения термопластичности.*

Основные уравнения модели термопластичности имеют вид [18, 19]:

– уравнение поверхности текучести Мизеса

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

где $C_{(p)}$ – текущий радиус поверхности текучести, а $\rho_{ij}^{(p)}$ – координаты ее центра;

– уравнение поверхности циклической «памяти»

$$F_{(\rho)} = \rho_{ij}^{(p)} \rho_{ij}^{(p)} - \rho_{max}^{(p)2} = 0, \quad (2)$$

где $\rho_{max}^{(p)}$ – максимальный за историю нагружения модуль $\rho_{ij}^{(p)}$,

$$\dot{\rho}_{max}^{(p)} = (\rho_{ij}^{(p)} \dot{\rho}_{ij}^{(p)}) H(F_{(\rho)}) / \sqrt{\rho_{mn}^{(p)} \rho_{mn}^{(p)}} - g_2 \rho_{max}^{(p)} \dot{\chi}_{(p)} - g_3 \rho_{max}^{(p)} \langle \dot{T} \rangle. \quad (3)$$

Здесь для величины \dot{T} , заключенной в $\langle \rangle$, выполняется условие

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

Для эволюции радиуса поверхности текучести постулируем уравнение [18, 19]

$$\dot{C}_{(p)} = [qH(F_{(\rho)}) + a(Q - C_{(p)})\Gamma(F_{(\rho)})] \dot{\chi}_{(p)} + q_3 \langle \dot{T} \rangle; \quad (4)$$

$$C_{(p)} = C_{(p)}^0 + \int_0^t \dot{C}_{(p)} dt, \quad \dot{\chi}_{(p)} = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\epsilon}_{ij}^{(p)} \dot{\epsilon}_{ij}^{(p)}, \quad \chi_{(p)} = \int_0^t \dot{\chi}_{(p)} dt; \quad (5)$$

$$q = q_2 A \psi_1 + (1 - A) q_1 / (A \psi_1 + (1 - A)), \quad (6)$$

$$Q = Q_2 A \psi_2 + (1 - A) Q_1 / (A \psi_2 + (1 - A)),$$

$$0 \leq \psi_i \leq 1, \quad i = 1, 2;$$

$$A = 1 - \cos^2 \theta, \quad \cos \Theta = n_{ij}^{(e)} n_{ij}^{(s)}, \quad n_{ij}^e = \dot{\epsilon}'_{ij} / \sqrt{\dot{\epsilon}'_{ij} \dot{\epsilon}'_{ij}}, \quad n_{ij}^{(s)} = S_{ij} / \sqrt{S_{ij} S_{ij}}; \quad (7)$$

$$H(F_{(\rho)}) = \begin{cases} 1, & F_{(\rho)} = 0 \text{ и } \rho_{ij}^{(p)} \dot{\rho}_{ij}^{(p)} > 0 \\ 0, & F_{(\rho)} < 0 \text{ или } \rho_{ij}^{(p)} \dot{\rho}_{ij}^{(p)} \leq 0 \end{cases}, \quad \Gamma(F_{(\rho)}) = 1 - H(F_{(\rho)}), \quad (8)$$

где a – постоянная, которая определяет скорость стабилизации формы петли пластического гистерезиса при циклическом деформировании материала; Q – значение радиуса поверхности текучести (стабилизированное) при соответствующих значениях $\rho_{max}^{(p)}$ и T ; $\chi_{(p)}$ – длина пути пластического деформирования материала; $C_{(p)}^0$ – начальный радиус поверхности текучести, q_1, q_2, q_3 – материальные параметры (модули) изотропного упрочнения (q_1 – лучевых путей нагружения, q_2 – излома траектории деформирования на 90° , q_3 – температурного изменения радиуса поверхности) [18, 19];

– уравнение для эволюции внутренней переменной ρ_{ij}^p

$$\dot{\rho}_{ij}^{(p)} = f(\chi_{(p)}^m) [g_1 \dot{\epsilon}_{ij}^{(p)} - g_2 \rho_{ij}^{(p)} \dot{\chi}_{(p)}] + g_3 \rho_{ij}^{(p)} \langle \dot{T} \rangle, \quad \rho_{ij}^{(p)} = \int_0^t \dot{\rho}_{ij}^{(p)} dt, \quad (9)$$

$$f(\chi_{(p)}^m) = 1 + k_1 (1 - e^{-k_2 \chi_{(p)}^m}), \quad g_3 = \left(\partial g_1 / \partial T - \frac{g_1}{g_2} \partial g_2 / \partial T \right) / g_1, \quad (10)$$

$$\chi_{(p)}^m = \int_0^t \dot{\chi}_{(p)} H(F_{(\rho)}) dt,$$



где $\chi_{(p)}^m$ — длина траектории пластического деформирования на монотонных участках, g_1, g_2, g_3 — модули анизотропного упрочнения (параметры материала), k_1, k_2 — экспериментально определяемые материальные параметры.

Представленный вариант уравнений включает в себя известную модель J. L. Chaboche, описывающую нелинейное кинематическое изотропное упрочнение без учета циклического упрочнения. Это особенно важно, так как позволяет поэтапное применение расчетного «кода» «ANSYS», в котором заложена модель J. L. Chaboche, и программного средства «EXPMODEL», в котором используется развитый вариант модели термопластичности.

2. Эволюционные уравнения накопления усталостных повреждений [3, 4, 20–22].

Постулируем, что уравнения накопления усталостных повреждений могут быть представлены в виде

$$\dot{\omega} = f_1(\beta) f_2(\omega) f_3(W_{(p)}) f_4(\dot{W}_{(p)}), \quad \dot{W}_{(p)} = \rho_{ij}^{(p)} \dot{e}_{ij}^{(p)}, \quad W_{(p)} = \int_0^{W_f} \rho_{ij}^{(p)} d\dot{e}_{ij}^{(p)}, \quad (11)$$

где функции $f_j, j = 1..4$ учитывают: объемность напряженного состояния ($f_1(\beta)$); уровень накопленной поврежденности ($f_2(\omega)$); накопленную относительную энергию повреждения, затраченную на образование дефектов ($f_3(W_{(p)})$), и скорость изменения энергии повреждения ($f_4(\dot{W}_{(p)})$).

В уравнении (11)

$$f_1(\beta) = \exp(\beta), \quad f_2(\omega) = \begin{cases} 0, & W_{(p)} \leq W_a, \\ \omega^{1/3}(1-\omega)^{2/3}, & W_{(p)} > W_a \wedge \omega \leq 1/3, \\ \frac{\sqrt[3]{16}}{9} \omega^{-1/3}(1-\omega)^{-2/3}, & W_{(p)} > W_a \wedge \omega > 1/3, \end{cases} \quad (12)$$

$$f_3(W_{(p)}) = \frac{W_{(p)} - W_a}{W_f - W_a}, \quad f_4(\dot{W}_{(p)}) = \frac{\dot{W}_{(p)}}{W_f - W_a}, \quad (13)$$

где W_a — значение $W_{(p)}$ в конце стадии зарождения усталостных повреждений, а W_f — значение $W_{(p)}$ в момент образования макротрещины.

3. Критерий прочности поврежденного материала: $\omega = \omega_f \leq 1$.

2. Численные результаты

Паровые турбины современных ТЭС и АЭС [23] являются двигателями, в которых потенциальная энергия пара превращается в кинетическую энергию, а затем и в механическую энергию вращения валопровода. Статор турбины состоит из корпуса, в который вварены сопловые коробки.

В процессе эксплуатации сопловая коробка паровой турбины испытывает термоциклическое нагружение при следующем режиме работы: быстрый пуск, рабочий режим, останов. В процессе эксплуатации перепад температур в конструктивных элементах сопловой коробки составляет от 400 до 20°C в местах концентрации напряжений с теоретическим коэффициентом концентрации, равным 2.2 [23, 24].

В работе [24] представлены результаты экспериментального исследования особенностей термической усталости образцов с концентраторами, имитирующих работу концентраторов напряжений в сопловой коробке паровой турбины АЭС.

Испытаниям подвергались толстостенные образцы из титанового сплава 5В, прошедшие предварительную термическую обработку, аналогичную штатному изделию. Образцы имели форму диска диаметром 200 мм и толщиной 10 мм с десятью вырезами — концентраторами напряжений.

На рис. 1 показаны пронумерованные вырезы А, Б, В, Г, Д соответственно с шириной $B_k = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ мм, радиусом в вершине выреза $R_k = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ мм и



коэффициентом концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 2.5, 2.0, 1.5, 1.25, 1.1$. Термоциклическое нагружение образцов осуществлялось периодическим индуктивным нагревом их торцевой поверхности с последующим воздушным охлаждением. Для контроля скорости изменения температуры торцевой и наружных поверхностей использовались термопары, места установки которых на рис. 1 обозначены точками с номерами 1–10.

На рис. 2 представлены результаты испытания образцов для двух режимов термоциклического нагружения при нагреве лицевой поверхности детали (до 450°C на первом режиме и до 373°C на втором) с последующим охлаждением до 100°C при времени цикла 450 с для первого режима и 350 с — для второго.

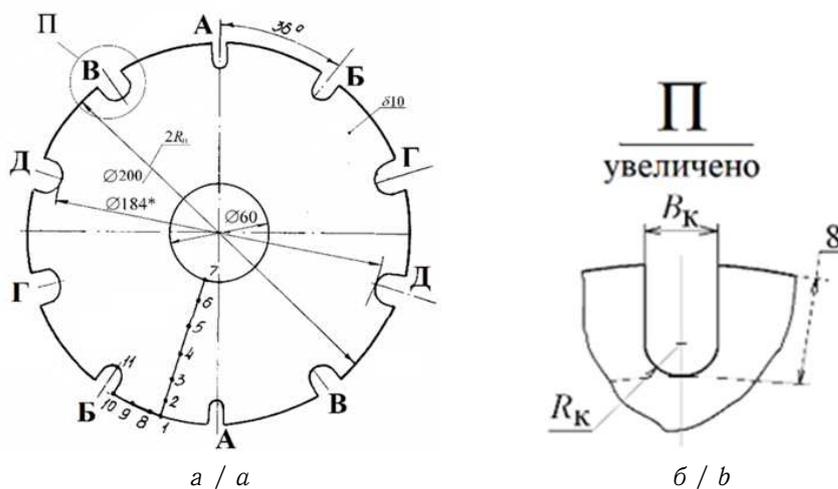


Рис. 1. Геометрия образцов с концентраторами: *a* — общий вид образцов; *b* — геометрия концентраторов напряжений (фрагмент образца)
 Fig. 1. Geometry of samples with concentrators: *a* is general view of samples; *b* is geometry of stress concentrators (sample fragment)

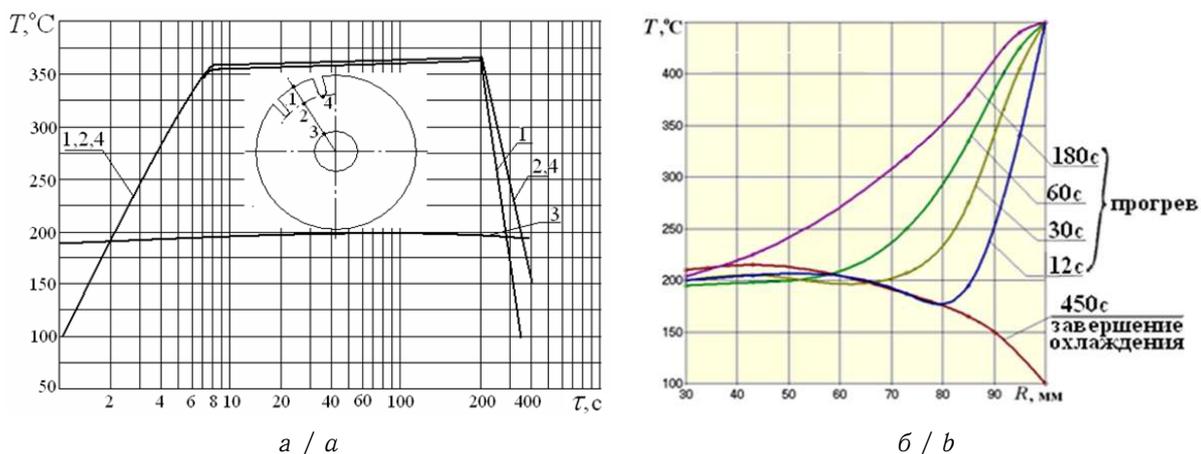


Рис. 2. Два режима термоциклического нагружения: *a* — зависимость температуры от времени в различных точках образца для режима нагружения 2; *b* — распределение температуры вдоль радиуса в различные моменты времени для режима нагружения 1

Fig. 2. Two modes of thermocyclic loading: *a* is temperature dependence on time at different points of the sample for loading mode 2; *b* is temperature distribution along the radius at different times for loading mode 1



В работе использована методология поэтапного численного моделирования. На первом этапе рассматривался индукционный разогрев детали с последующим охлаждением как нестационарная задача теплопроводности с расчетом кинетики поля температур при термодинамическом нагружении в инженерном пакете «ANSYS» (лицензия Customer 244793).

Для трех циклов нагружения (рис. 3) представлено распределение поля температур в образцах в различные моменты времени в процессе термоциклирования для режима нагружения. Анализ результатов показывает, что поле температуры по объему образца сильно неоднородно. В области концентраторов напряжений за цикл нагружения температура изменяется $\sim 250^{\circ}\text{C}$. Видно, что процесс изменения температурного поля стабилизируется на третьем цикле.

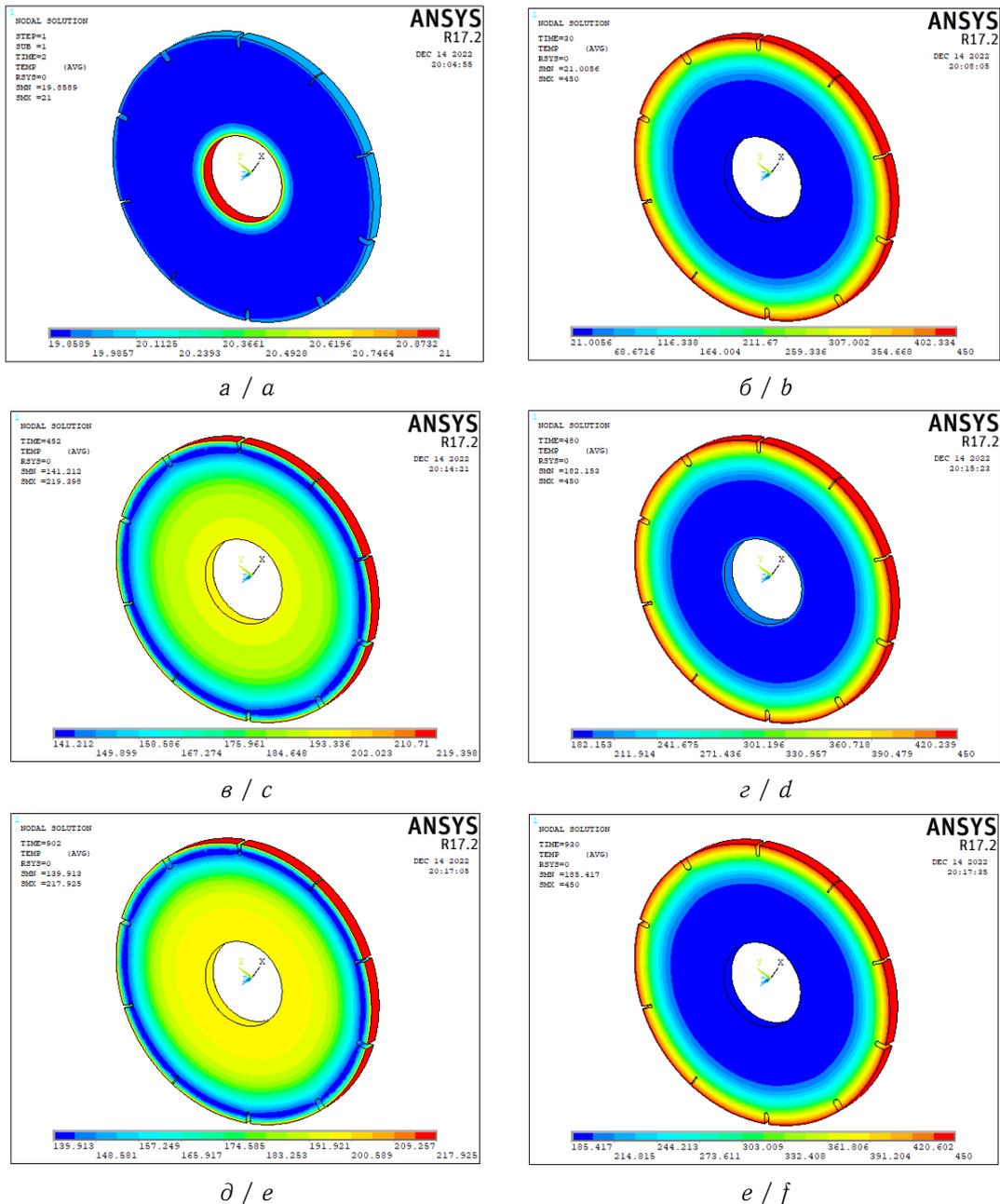
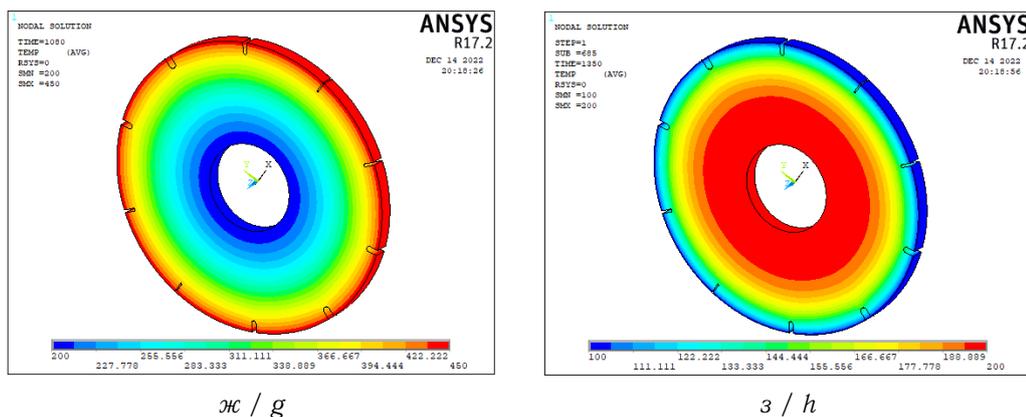


Рис. 3. Распределение поля температур в образце в различные моменты времени для режима нагружения 1 (цвет онлайн)

Fig. 3. Distribution of the temperature field in the sample at different time points for the loading mode 1 (color online)



Окончание рис. 3 / Continuation of Fig. 3

На втором этапе проводился расчет кинетики НДС в упругопластической постановке в инженерном пакете «ANSYS». При решении задачи прочностного анализа в качестве условий нагружения образца использовались тепловые поля, полученные на этапе расчета нагрева и охлаждения образца. Анализ результатов расчета показал, что максимальные значения интенсивности напряжений и интенсивности пластических деформаций наблюдаются в вершинах концентраторов напряжений (вырезах). Эти данные позволили на третьем этапе провести оценку термоциклической усталостной долговечности образца с концентратором с помощью разработанного программного средства «EXPMODEL» [3, 4].

На рис. 4 показана история изменения температуры и компонент тензора деформаций от числа циклов нагружения в зоне концентратора для режима термоциклического нагружения 1, полученного с использованием инженерного пакета «ANSYS».

Основные прочностные свойства и параметры модели МПС для титанового сплава 5В при температурах 20, 100, 350 и 450°C соответственно следующие: $K = 94\,167, 94\,167, 83\,333, 80\,000$ МПа, $G = 43\,462, 43\,462, 38\,462, 36\,923$ МПа, $C^0_{(p)} = 450, 382, 252, 225$ МПа, $g_1 = 205\,000, 188\,000, 129\,000, 115\,000$ МПа, $g_2 = 1050, 1120, 1190, 1140$, $a = 20$, $W_a = 0$, $W_f = 694, 688, 641, 611$ МДж/м³.

На рис. 5 для первого режима термоциклического нагружения приведены зависимости петель термопластического гистерезиса $\sigma_{11} \sim e_{11}$, $\sigma_{22} \sim e_{22}$ в зоне концентратора напряжений для вершин выреза А, Б, В и Г и коэффициента концентрации 2.5, 2.0, 1.5 и 1.25 соответственно.

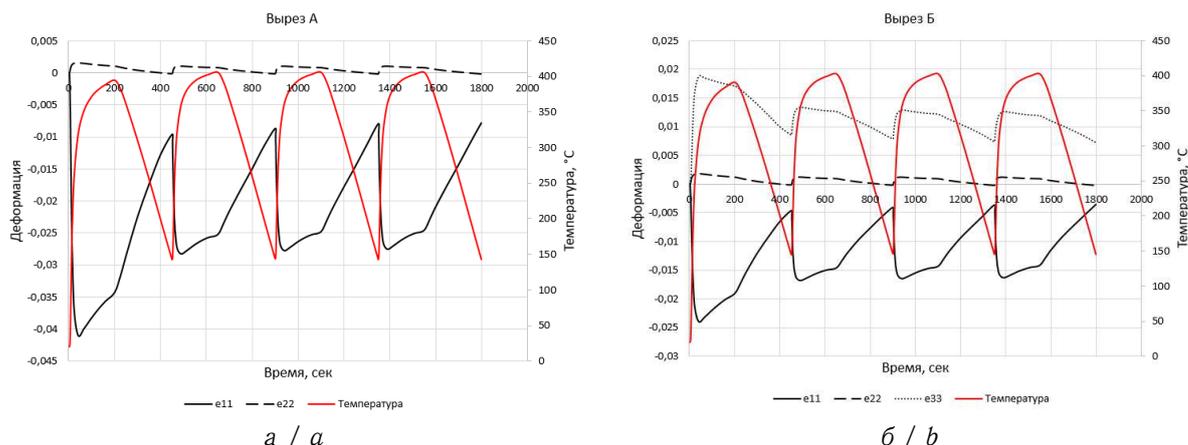
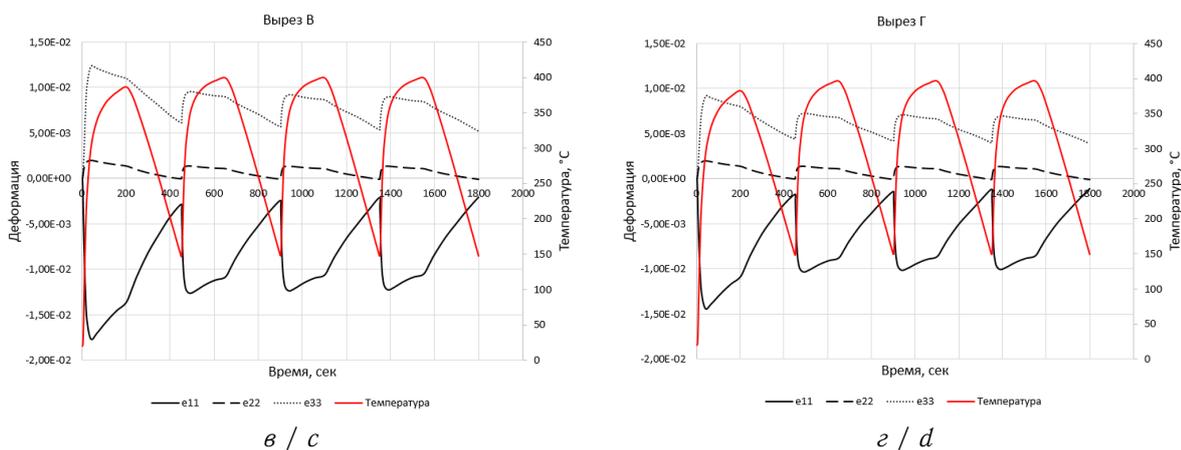


Рис. 4. История термомеханического нагружения в вершине концентратора напряжений для режима нагружения 1: а – вырез А с коэффициентом концентрации 2.5; б – вырез Б с коэффициентом концентрации 2.0 (цвет онлайн)

Fig. 4. The history of thermomechanical loading at the top of the stress concentrator for loading mode 1: а is cutout А with a concentration coefficient of 2.5; б is cutout Б with a concentration coefficient of 2.0 (color online)



Окончание рис. 4. *в* — вырез В с коэффициентом концентрации 1.5; *г* — вырез Г с коэффициентом концентрации 1.25

Continuation of Fig. 4. *c* is cutout B with a concentration coefficient of 1.5; *d* is cutout Г with a concentration coefficient of 1.25

На рис. 6 приведены траектории нагружения в координатах $e_{11} \sim e_{22}$ для вершин выреза А, Б, В и Г и коэффициента концентрации 2.5, 2.0, 1.5 и 1.25 соответственно. Черным цветом маркированы результаты моделирования по созданной модели поврежденной среды, полученные с помощью программного средства «EXPMODEL» [3, 4], а красным цветом — результаты с использованием модели J. L. Chaboche, заложенной в программном комплексе «ANSYS». Видно качественное и количественное совпадение результатов (модель термопластичности, заложенная в «EXPMODEL» как частный случай, включает в себя и модель из пакета «ANSYS» [3, 4]).

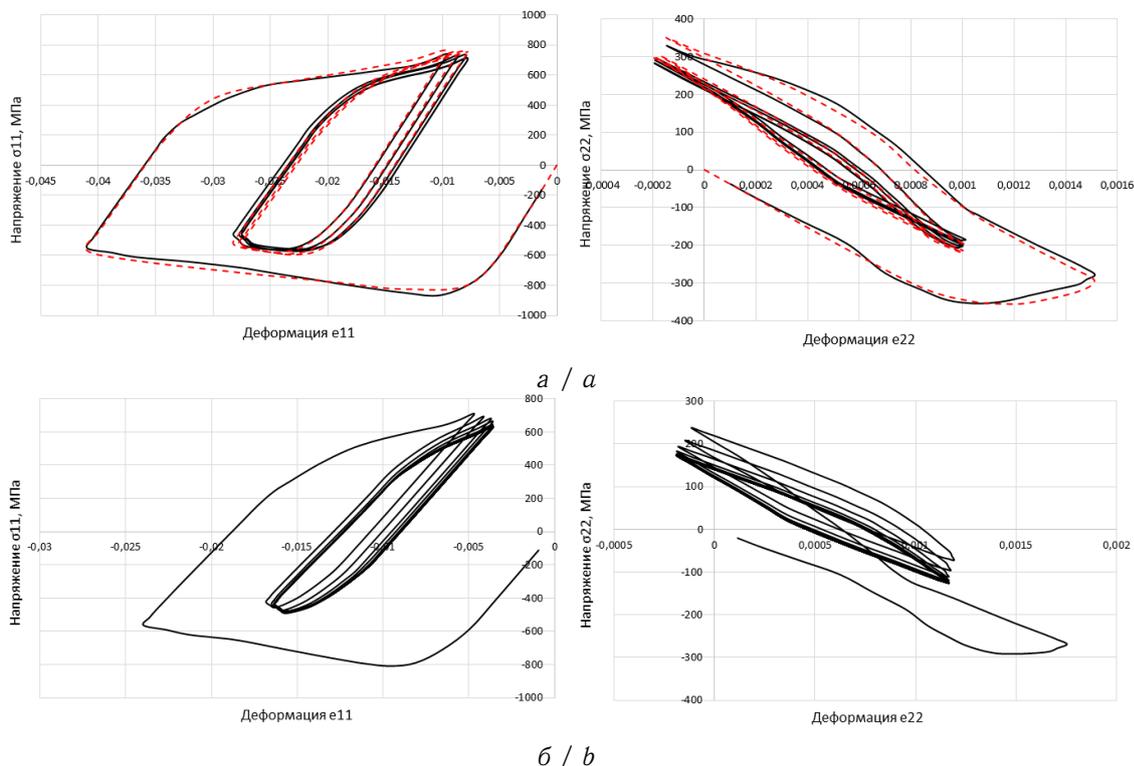
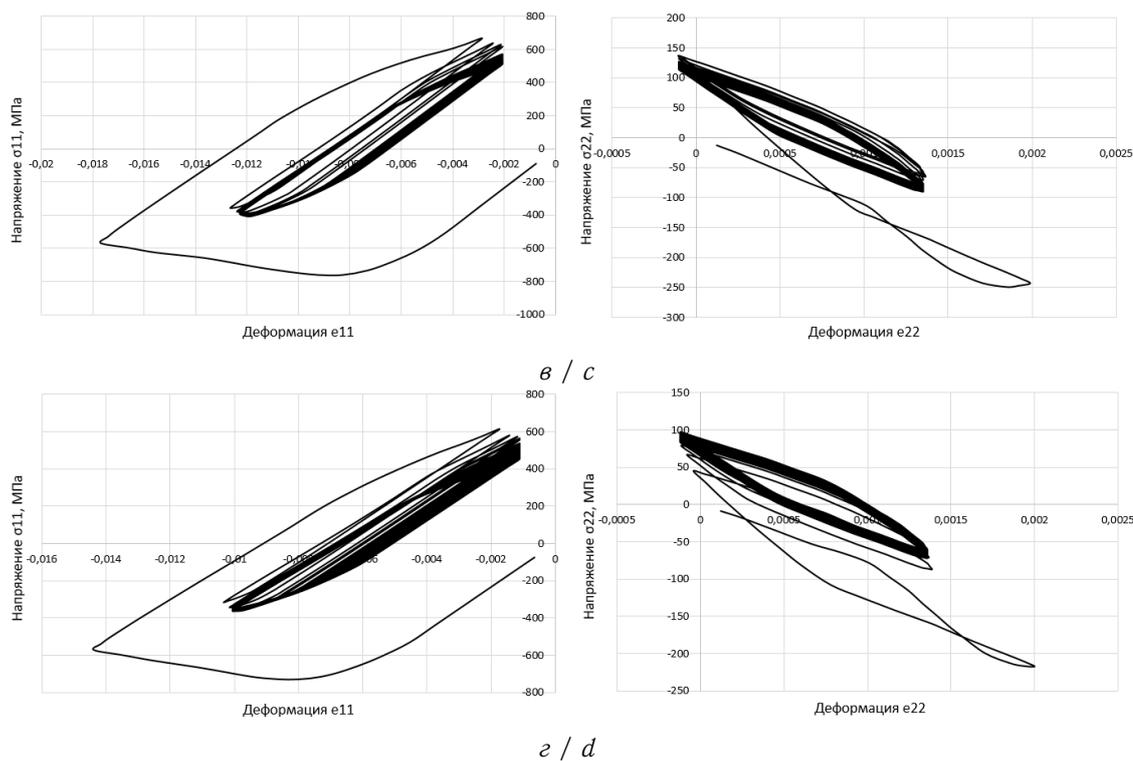


Рис. 5. Диаграммы деформирования $\sigma_{11} \sim e_{11}$, $\sigma_{22} \sim e_{22}$ в вершине концентратора напряжений: *а* — вырез А; *б* — вырез Б; *в* — вырез В (красный цвет — результаты с использованием пакета «ANSYS», черный цвет — результаты с использованием программного средства «EXPMODEL») (цвет онлайн)

Fig. 5. Deformation diagrams $\sigma_{11} \sim e_{11}$, $\sigma_{22} \sim e_{22}$ at the vertex of the stress concentrator: *a* is cutout A; *b* is cutout B (red color is results using the package “ANSYS”, black color is results using the software tool “EXPMODEL”) (color online)



Окончание рис. 5. *в* – вырез В; *г* – вырез Г
Continuation of Fig. 5. *c* is cutout C; *d* is cutout D

В таблице приведены результаты экспериментальных и расчетных данных по усталостной долговечности образцов.

Анализ результатов численного моделирования показывает качественное и необходимое для практических расчетов соответствие расчетных и экспериментальных данных [24]. С использованием программного средства «EXPMODEL» и методологии, обеспечивающей сквозное моделирование поэтапного расчета теплового состояния трехмерной упругопластической задачи прочности и дальнейшего использования полученных результатов в качестве условий неизотермического циклического нагружения при решении задачи оценки ресурса, выполнена оценка усталостной долговечности образцов, имитирующих работу концентраторов в сопловой коробке паровой турбины АЭС.

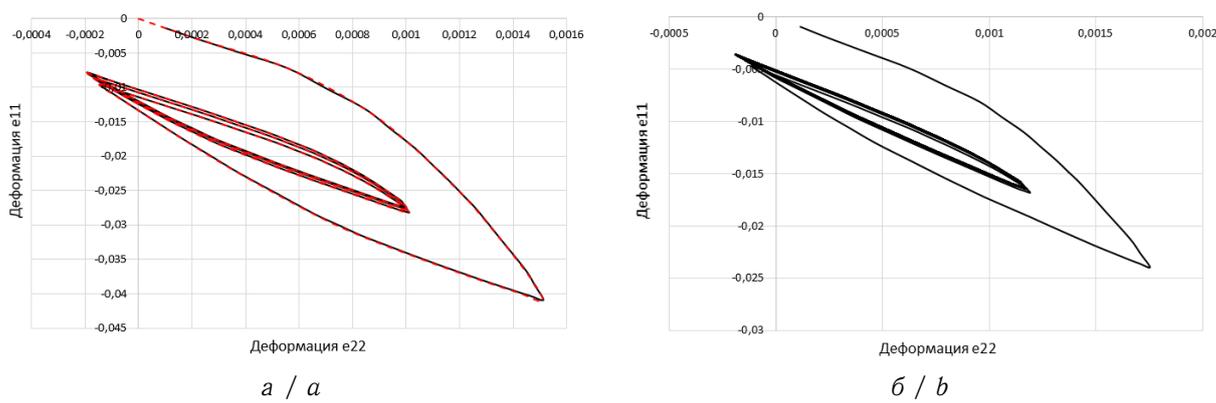
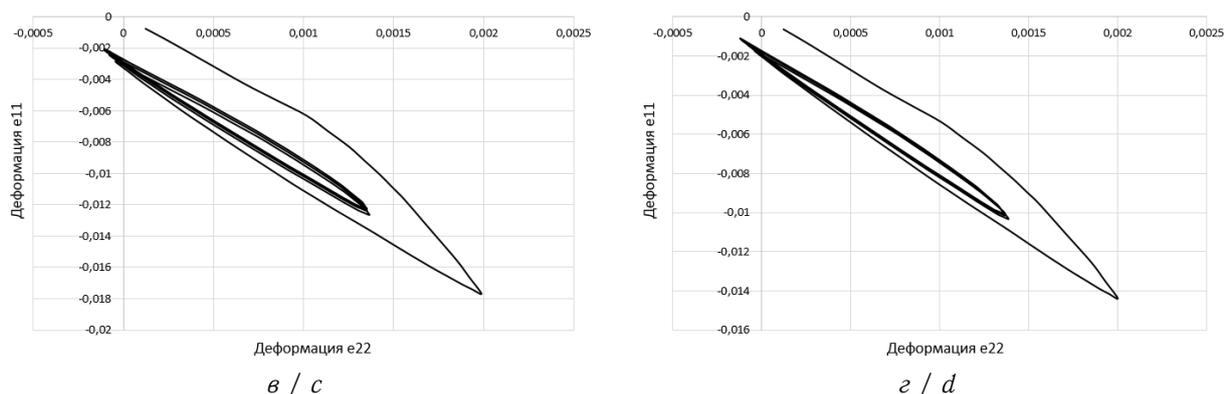


Рис. 6. Траектории нагружений $e_{11} \sim e_{22}$ в вершине концентратора напряжений: *а* – вырез А; *б* – вырез Б (красный цвет – результаты с использованием пакета «ANSYS», черный цвет – результаты с использованием программного средства «EXPMODEL») (цвет онлайн)
Fig. 6. Loading trajectories $e_{11} \sim e_{22}$ at the top of the stress concentrator: *a* is cutout A; *b* is cutout B (red is results using the package “ANSYS”, black is results with using the “EXPMODEL” software) (color online)



Окончание рис. 6. *v* – вырез В; *z* – вырез Г
Continuation of Fig. 6. *c* is cutout B; *d* is cutout D

Усталостная долговечность образцов при термоциклическом нагружении
Table. Fatigue life of samples under thermal cyclic loading

Вырез	Число циклов до разрушения (опыт)	Среднее число циклов	Число циклов до разрушения (расчет)	Относительное отклонение (%)
А	164 ÷ 477	320	215	32.8
Б	552 ÷ 956	739	778	5.3
В	1415 ÷ 1670	1543	1422	7.8
Г	2050 ÷ 2500	2275	2175	4.4
Д	>5000	–	>5000	–

Заклучение

С современных позиций механики деградируемого континуума развита математическая модель для инженерных расчетов ресурсных характеристик материалов и конструкций при термоциклическом нагружении. Возможности применения математической модели поведения материала в инженерном компьютерном анализе продемонстрированы на примере расчета состояния объекта атомной энергетики. Методом численного моделирования и сопоставления полученных результатов с опытными данными проанализирована возможность применимости предложенной методологии оценки ресурса ответственных инженерных объектов при термической усталости.

Список литературы

1. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок / под общ. ред. Ф. М. Митенкова. Москва : Машиностроение, 2007. 445 с. EDN: [QMJWTB](#)
2. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях: Анализ, предсказание, предотвращение. Москва : Мир, 1984. 624 с.
3. Волков И. А., Коротких Ю. Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. Москва : Физматлит, 2008. 424 с. EDN: [RYRTNT](#)
4. Волков И. А., Игумнов Л. А. Введение в континуальную механику поврежденной среды. Москва : Физматлит, 2017. 304 с.
5. Корум С. Оценка современной методологии проектирования высокотемпературных элементов конструкций на основе экспериментов по их разрушению // Теоретические основы инженерных расчетов. 1988. № 1. С. 104–118.
6. Гаенко В. П., Костюков В. Е., Фомченко В. Н. Безопасность технических систем. Методологические аспекты теории, методы анализа и управления безопасностью. Саратов : РЯЦ-ВНИИЭФ, 2020. 329 с. <https://doi.org/10.53403/9785951504524>, EDN: [OPPFHW](#)
7. Lemaitre J. Damage modelling for prediction of plastic or creep fatigue failure in structures // 1979–SMiRT 5–Berlin, Germany. Paper no. L5/1b. <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.20/26896>
8. Murakami S., Imaizumi T. Mechanical description of creep damage state and its experimental verification // Journal de Mecanique Theorique et Appliquee. 1982. № 1. P. 743–761.



9. Леметр Ж. Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластичных материалов // Теоретические основы инженерных расчетов. 1985. Т. 107, № 1. С. 90–98.
10. Chaboche J. L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity // International Journal of Plasticity. 1989. Vol. 5, iss. 3. P. 247–302.
11. Казаков Д. А., Канустин С. А., Коротких Ю. Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. Нижний Новгород : Изд-во ННГУ. 1994. 225 с.
12. Volkov I. A., Igumnov L. A., Shishulin D. N., Boev E. V. Numerical modeling of the fatigue life of structural steels under single-frequency and dual-frequency loading // Mechanics of Solids. 2022. Vol. 57, iss. 1. P. 86–101. <https://doi.org/10.3103/S0025654422010162>
13. Volkov I. A., Igumnov L. A., delly Izola 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 // Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2020. Vol. 32, iss. 1. P. 229–245. <https://doi.org/10.1007/s00161-019-00795-x>, EDN: WOFFAL
14. Volkov I. A., Igumnov L. A., Shishulin D. N. Modeling plastic deformation and damage accumulation processes in structural steels under block non-symmetric low-cycle loading // Materials Physics and Mechanics. 2019. Vol. 42, iss. 3. P. 359–366. https://doi.org/10.18720/MPM.4232019_11
15. Прилуцкий М. Х., Костюков В. Е. Поточные модели для предприятий с непрерывным циклом изготовления продукции // Информационные технологии. 2007. № 10. С. 47–51. EDN: IJQBOB
16. Prilutskii M. Kh., Kostyukov V. E. Optimization models of gas recovery and gas condensate processing // Automation and Remote Control. 2012. Vol. 73, iss. 5. P. 905–909. <https://doi.org/10.1134/S0005117912050153>
17. Прилуцкий М. Х., Костюков В. Е. Оптимизационные задачи планирования транспортировки газа // Информационные технологии и вычислительные системы. 2007. № 2. С. 67–73. EDN: KUVAWB
18. Митенков Ф. М., Волков И. А., Игумнов Л. А., Каплиенко А. В., Коротких Ю. Г., Панов В. А. Прикладная теория пластичности. Москва : Физматлит, 2015. 282 с. EDN: ZBOSEH
19. Волков И. А., Игумнов Л. А., Коротких Ю. Г. Прикладная теория вязкопластичности. Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2015. 318 с.
20. Новожилов В. В., Кадашевич Ю. И., Рыбакина О. Г. Разрыхление и критерий разрушения в условиях ползучести // Доклады Академии наук СССР. 1983. Т. 270, № 4. С. 831–835.
21. Гаруд. Новый подход к расчету усталости при многоосных нагружениях // Теоретические основы инженерных расчетов. 1981. Т. 103, № 2. С. 41–51.
22. Боднер С. Р., Линдхолм У. С. Критерий приращения повреждения для зависящего от времени разрушения материалов // Теоретические основы инженерных расчетов. 1976. Т. 100, № 2. С. 51–58.
23. Нарезько А. В., Пантелей Н. В. Паровые турбины. Тепловые и атомные электрические станции. Минск : БНТУ, 2015. 71 с.
24. Травин В. В., Зможный А. И., Шевелев Г. А., Денисенко Ю. А. Термоциклическая прочность титанового сплава в деталях энергооборудования // Титан. 2022. № 1 (74). С. 30–39. EDN: GDJTYE

References

1. Mitenkov F. M. (ed.) *Metody obosnovaniya resursa yadernykh energeticheskikh ustanovok* [Methods for Justifying the Service Life of Nuclear Power Plants]. Moscow, Mashinostroenie Publishers, 2007. 445 p. (in Russian). EDN: QMJWTB
2. Kollinz Dzh. *Povrezhdenie materialov v konstruktsiyakh: Analiz, predskazanie, predotvrashchenie* [Damage to Materials in Structures: Analysis, Prediction, Prevention]. Moscow, Mir, 1984. 624 p. (in Russian).
3. Volkov I. A., Korotkikh Yu. G. *Uravneniya sostoyaniya vyazkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami* [Equations of State of Viscoelastoplastic Media with Damage]. Moscow, Fizmatlit, 2008. 424 p. (in Russian). EDN: RYRTNT
4. Volkov I. A., Igumnov L. A. *Vvedenie v kontinual'nuyu mekhaniku povrezhdennoy sredy* [Introduction to Continuum Mechanics of Damaged Media]. Moscow, Fizmatlit, 2017. 304 p. (in Russian).
5. Korum S. Evaluation of modern methodology for designing high temperature elements structures based on experiments on their destruction. *Journal of Engineering for Industry*, 1988, iss. 1, pp. 104–118 (in Russian).
6. Gaenko V. P., Kostyukov V. E., Fomchenko V. N. *Bezopasnost' tekhnicheskikh sistem. Metod-*



- logicheskie aspekty teorii, metody analiza i upravleniya bezopasnost'yu* [Safety of Technical Systems. Methodological Aspects of the Theory, Methods of Analysis and Safety Management]. Sarov, RFYaTs-VNIEF, 2020. 329 p. (in Russian). <https://doi.org/10.53403/9785951504524>, EDN: **OPPFHW**
7. Lemaitre J. Damage modelling for prediction of plastic or creep fatigue failure in structures. 1979–SMiRT 5–Berlin, Germany. Paper no. L5/1b. <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.20/26896>
 8. Murakami S., Imaizumi T. Mechanical description of creep damage state and its experimental verification. *Journal de Mecanique Theorique et Appliquee*, 1982, iss. 1, pp. 743–761.
 9. Lemetr Zh. Continuum damage model used to calculate the failure of ductile materials. *Journal of Engineering for Industry*, 1985, vol. 107, iss. 1, pp. 90–98 (in Russian).
 10. Chaboche J. L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *International Journal of Plasticity*, 1989, vol. 5, iss. 3, pp. 247–302.
 11. Kazakov D. A., Kapustin S. A., Korotkikh Yu. G. *Modelirovanie protsessov deformirovaniya i razrusheniya materialov i konstruktsiy* [Modeling of Deformation Processes and Destruction of Materials and Structures]. Nizhny Novgorod, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod Publ., 1994. 225 p. (in Russian).
 12. Volkov I. A., Igumnov L. A., Shishulin D. N., Boev E. V. Numerical modeling of the fatigue life of structural steels under single-frequency and dual-frequency loading. *Mechanics of Solids*, 2022, vol. 57, iss. 1, pp. 86–101. <https://doi.org/10.3103/S0025654422010162>
 13. Volkov I. A., Igumnov L. A., delly Izola 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, iss. 1, pp. 229–245. <https://doi.org/10.1007/s00161-019-00795-x>, EDN: **WOFFAL**
 14. Volkov I. A., Igumnov L. A., Shishulin D. N. Modeling plastic deformation and damage accumulation processes in structural steels under block non-symmetric low-cycle loading. *Materials Physics and Mechanics*, 2019, vol. 42, iss. 3, pp. 359–366. https://doi.org/10.18720/MPM.4232019_11
 15. Prilutskii M. Kh., Kostukov V. E. Network flow models for enterprises with continuous production manufacturing cycle. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technology], 2007, iss. 10, pp. 47–51 (in Russian). EDN: **IJQBOB**
 16. Prilutskii M. Kh., Kostyukov V. E. Optimization models of gas recovery and gas condensate processing. *Automation and Remote Control*, 2012, vol. 73, iss. 5, pp. 905–909. <https://doi.org/10.1134/S0005117912050153>
 17. Prilutskiy M. Kh., Kostyukov V. E. Optimization problems of transportation planning gas. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*, 2007, iss. 2, pp. 67–73 (in Russian). EDN: **KUVAWB**
 18. Mitenkov F. M., Volkov I. A., Igumnov L. A., Kaplienko A. V., Korotkikh Yu. G. *Prikladnaya teoriya plastichnosti* [Applied Plasticity Theory]. Moscow, Fizmatlit, 2015. 284 p. (in Russian). EDN: **ZBOSEH**
 19. Volkov I. A., Igumnov L. A., Korotkikh Yu. G. *Prikladnaya teoriya vyazkoplastichnosti* [Applied Theory of Viscoplasticity]. Nizhny Novgorod, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod Publ., 2015. 318 p. (in Russian).
 20. Novozhilov V. V., Kadashevich Yu. I., Rybakina O. G. Plastic dilatation and a fracture criterion under conditions of creep. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1983, vol. 270, iss. 4, pp. 831–835 (in Russian).
 21. Garud. A new approach to calculating fatigue under multiaxial loading. *Journal of Engineering for Industry*, 1981, vol. 103, iss. 2, pp. 41–51 (in Russian).
 22. Bodner S. R., Lindholm U. S. Damage increment criterion for time-dependent destruction of materials. *Journal of Engineering for Industry*, 1976, vol. 100, iss. 2, pp. 51–58 (in Russian).
 23. Narez'ko A. V., Panteley N. V. *Parovye turbiny. Teplovye i atomnye elektricheskie stantsii* [Steam Turbines. Thermal and Nuclear Power Plants]. Minsk, Belarusian National University of Technology Publ., 2015. 71 p. (in Russian).
 24. Travin V. V., Zmozhnny A. I., Shevelev G. A., Denisenko Yu. A. Thermocyclic strength of titanium alloy in the details of power equipment. *Titan*, 2022, iss. 1 (74), pp. 30–39 (in Russian). EDN: **GDJTYE**

Поступила в редакцию / Received 30.11.2023

Принята к публикации / Accepted 28.12.2023

Опубликована / Published 01.03.2024