

УДК 539.3

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ  
ДОЛГОВЕЧНОСТИ МОДЕЛЕЙ ЖАРОВЫХ ТРУБ  
С РАЗЛИЧНЫМИ УГЛАМИ НАКЛОНА  
ОХЛАЖДАЮЩИХ КАНАЛОВ\***

© 2017 г. **Волков И.А.<sup>1,2</sup>, Игумнов Л.А.<sup>2</sup>, Шишулин Д.Н.<sup>3</sup>,  
Тарасов И.С.<sup>1</sup>, Гусева М.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Волжский государственный университет водного транспорта,  
Нижний Новгород, Российская Федерация*

<sup>2</sup>*Научно-исследовательский институт механики  
Национального исследовательского Нижегородского государственного  
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

<sup>3</sup>*Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация*

pmptmvgavt@yandex.ru

*Поступила в редакцию 20.03.2017*

Обсуждается проблема оценки прочности и ресурса ответственных инженерных объектов, эксплуатационные свойства которых характеризуются многопараметрическими нестационарными термомеханическими воздействиями. Рассмотрены некоторые деградационные механизмы конструкционных материалов (металлов и их сплавов), характерные для данных объектов. Сформулированы основные требования к математическим моделям накопления усталостных повреждений. На базе развитого варианта определяющих соотношений механики поврежденной среды проведен численный анализ влияния угла наклона охлаждающих каналов на термоциклическую долговечность моделей жаровых труб камер сгорания газотурбинных двигателей. Особое внимание уделено вопросам исследования процессов сложного термоциклического деформирования и накопления усталостных повреждений, сопровождающихся вращением главных площадок тензоров напряжений, полных и пластических деформаций и процессам накопления усталостных повреждений. Сопоставление результатов проведенных расчетов с экспериментальными данными показало, что развитая модель механики поврежденной среды качественно и с необходимой для инженерных расчетов точностью количественно описывает опытные данные и может эффективно применяться для оценки термоциклической долговечности материалов и конструкций при многоосных непропорциональных путях термоциклического нагружения.

*Ключевые слова:* термоциклическая долговечность, механика поврежденной среды, сложное деформирование, модельные образцы жаровых труб, охлаждающий канал, угол наклона, макроскопическая трещина, прочность, разрушение.

---

\* Выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект № 16-19-10237).

## Введение

Конструкции и аппараты современного транспортного и энергомашиностроения характеризуются увеличением их рабочих параметров, снижением металлоемкости за счет рационального проектирования и применения новых конструкционных материалов, значительным ростом удельного веса нестационарных режимов термоциклического нагружения, существенным расширением температурного диапазона работы конструкций. Все более жесткие требования предъявляются к снижению материалоемкости конструкций, что приводит к повышению общей и местной напряженности конструктивных элементов и, как следствие, уменьшению коэффициента запаса прочности. Одновременно значительно увеличиваются требования к надежности и длительности безаварийной эксплуатации как конструкций в целом, так и отдельных конструктивных элементов. Подобные тенденции привели к тому, что в настоящее время одной из основных задач проектирования конструкций и аппаратов новой техники становится решение задачи надежной расчетной оценки ресурса вновь проектируемых аппаратов, диагностики выработанного и прогнозирования индивидуального остаточного ресурса конструкций в процессе эксплуатации. Особенно актуальны эти задачи для конструкций и аппаратов, срок службы которых составляет несколько десятков лет (атомные энергетические установки, нефтехимическое оборудование, авиационные газотурбинные двигатели (ГТД), газотурбинные установки (ГТУ) нового поколения и др.).

Внезапные прочностные отказы конструктивных элементов являются следствием неконтролируемых процессов деградации начальных прочностных свойств конструкционных материалов в результате процессов накопления повреждений под воздействием физических полей различной природы.

Ввиду локальности деградационных процессов ресурс конструктивных элементов определяется ресурсом его опасных зон с наибольшими темпами деградационных процессов, параметры которых могут сильно различаться из-за различия свойств конструкционных материалов, конструктивных особенностей, эксплуатационных условий, технологии изготовления и т.п.

На стадии проектирования обеспечение безопасности с точки зрения прочности сводится к проектному обоснованию заданного ресурса (наработки) в течение заданного срока службы для заданной консервативной модели эксплуатации объекта (заданной истории нагруженности конструктивного узла) с определенными запасами на «незнание» истинных условий эксплуатации, реальных физико-механических и прочностных характеристик конструкционных материалов, предельных состояний, приближенности расчетных методик и т.п.

Решение указанной проблемы возможно при реализации методологии эксплуатационного мониторинга ресурса [1], одной из основных задач которого является контролирование в процессе эксплуатации объекта индивидуального выработанного ресурса каждой опасной зоны наиболее нагруженных конструктивных элементов объекта, индивидуальной поврежденности материала этих зон по известной фактической истории их деформирования на базе математического моделирования процессов деградации с использованием современных моделей и методов механики поврежденной среды (МПС) и механики разрушения (МР) [2–6].

Полученные путем численного моделирования расчетные значения поврежденности материала в доступных зонах должны корректироваться путем периоди-

ческого неразрушающего контроля состояния материала современными физическими методами.

К настоящему времени разработано большое количество определяющих соотношений, описывающих процессы поврежденности материала. Однако их большинство ориентировано только на определенные режимы нагружения, не связано с конкретными уравнениями процессов деформирования и, следовательно, не может отразить зависимость процессов накопления повреждений от истории изменения напряженно-деформированного состояния (НДС), температуры, скорости деформаций. На самом деле история вязкопластического деформирования (вид траектории деформирования, характер изменения температуры, вид напряженного состояния, история его изменения и т.п.) существенно влияет на скорость протекания процессов накопления повреждений. Это подчеркивает важность рассмотрения кинетики НДС в опасных зонах конструктивных элементов и ее теоретического описания соответствующими уравнениями состояния. Можно сказать, что в настоящее время развитие математических моделей вязкоупругопластических сред должно определяться потребностями механики разрушения и должно быть направлено на описание основных эффектов, существенно влияющих на скорость процессов накопления повреждений. Цель исследований в этой области – не столько уточнение различных формулировок, необходимых для определения макроскопических деформаций по заданной истории нагружения, сколько стремление разобраться в основных закономерностях физических процессов, подготавливающих и определяющих разрушение.

Эффекты деформирования при термомеханическом нагружении определяются зависимостью физико-механических характеристик конструкционных материалов от температуры, наличием ограничений температурных деформаций и соотношением скоростей механической и температурной деформаций. В связи с тем, что частоты и фазы циклов изменения температуры и компонент тензора механической деформации, как правило, не совпадают, неизотермическое циклическое нагружение является нерегулярным, непропорциональным, многоосным и сопровождается вращением главных площадок тензоров напряжений и деформаций [7–9].

Снижение усталостной долговечности при термомеханическом нагружении происходит в результате действия дополнительных механизмов деградации, которые отсутствуют при изотермическом нагружении (изменение структуры материала, дополнительное деформационное старение, усиление влияния окружающей среды).

Большое влияние при термоциклическом нагружении на долговечность материалов оказывают скорости изменения нагрузки и температуры и общая длительность цикла нагружения. Таким образом, при термоциклической усталости число циклов до разрушения становится недостаточной характеристикой долговечности и необходимо учитывать время до разрушения.

Повреждение и разрушение материалов в основном обусловлено зарождением микродефектов, их ростом и слиянием в макроскопические трещины. Описание механического поведения микродефектов не менее важно, чем описание развития макродефектов (трещин), в связи с чем в последнее десятилетие успешно развивается новое научное направление – механика поврежденной среды [2–6, 10–12].

В публикациях [6, 10–12] с современных позиций МПС развита математическая модель, описывающая процессы неизотермического циклического вязкопластического

тического деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах (металлах и их сплавах) при многоосных непропорциональных путях комбинированного термомеханического нагружения. В [13] приводятся результаты численного моделирования циклического термопластического деформирования и накопления повреждений в жаропрочном сплаве Nimonic 80A при синфазном и противофазном циклическом термомеханическом нагружении. В [14] в целях качественной и количественной оценки модели МПС приведено исследование влияния законов изменения механической деформации и температуры (вида траектории деформирования) на усталостную долговечность жаропрочного сплава Haynes 188 при непропорциональных режимах термомеханического нагружения. В статье [15] приведены результаты численных исследований закономерностей накопления усталостных повреждений в компактном образце с концентраторами при блочном термоциклическом нагружении в условиях неоднородного напряженного состояния.

В настоящей статье с использованием определяющих соотношений МПС [6, 10–12] проведен численный анализ термоциклической долговечности моделей жаровых труб из сплава ВЖ-159 с различными углами наклона охлаждающих каналов. Результаты расчета сравниваются с экспериментальными данными.

### Результаты исследований

В современных газотурбинных двигателях эффективно применяется защита стенок жаровых труб камер сгорания с помощью заградительной пелены охлаждающего воздуха и покрытий [16]. Рационально организованное пленочное охлаждение позволяет понизить температуру последней секции жаровых труб примерно до 300 °С, тем самым обеспечивая увеличение их термоциклической долговечности более чем в 5 раз.

В статье [17] впервые в отечественной литературе описаны экспериментальные исследования по влиянию углов наклона охлаждающих отверстий (каналов) моделей образцов жаровых труб на их термоциклическую долговечность, изложены экспериментальные результаты оценки термоциклической долговечности моделей жаровых труб при варьировании угла наклона охлаждающих каналов и их диаметра.

Испытывались полые образцы коробчатой формы из жаропрочного сплава ВЖ-159 с толщиной стенки 1 мм (рис. 1а). Вдоль оси образца прорезались ряды отверстий диаметрами 1, 1,5 и 2 мм и шагом 5 мм. На одной половине образцов отверстия располагались под углом к поверхности  $\beta = 90^\circ$ , а на другой – под углом  $\beta = 35^\circ$  (рис. 1б). Режим термоциклирования трапецеидальный, температура на поверхности детали:  $T_{\min} = 350^\circ\text{C}$ ,  $T_{\max} = 900^\circ\text{C}$ . Время разогрева 5 с. При  $T = 900^\circ\text{C}$  образец выдерживался в течение 7 с. Охлаждающий воздух внутрь образца подавался с постоянным расходом 12 г/с через захват машины. Контроль над расходом воздуха осуществлялся расходомером. На верхний торец образца устанавливалась заглушка. Температурное состояние перфорированной стенки модели контролировалось с помощью тепловизора. Контроль образования макроскопической трещины осуществлялся визуально непрерывно во время испытаний и периодически с помощью бинокулярного микроскопа [17].

Результаты испытаний на термоусталость модельных образцов жаровых труб из жаропрочного сплава ВЖ-159 с различными углами наклона охлаждающих каналов диаметром 1 мм представлены в таблице 1.

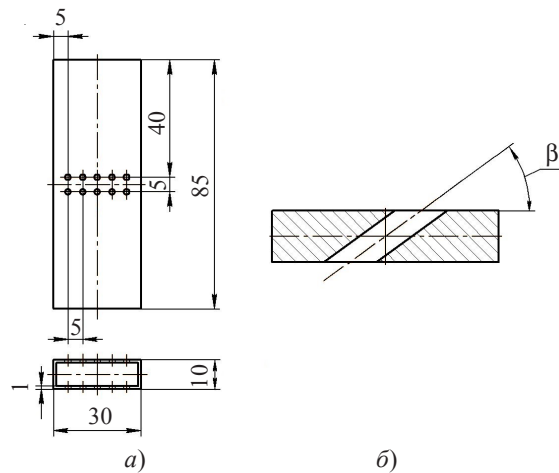


Рис. 1

Таблица 1

**Термоциклическая долговечность модельных образцов до образования макроскопической трещины при испытаниях по режиму  $350 \leftrightarrow 900 \text{ }^\circ\text{C}$**

Угол наклона оси каналов к поверхности $\beta$ , град	Число циклов до разрушения $N$ (термоциклическая долговечность) (эксперимент)						Среднее значение числа циклов до разрушения $N_{\text{ср}}$ (эксперимент)	Число циклов до разрушения $N$ (расчет)
	983	576	851	950	765	1431		
90	983	576	851	950	765	1431	926	972
35	200	117	174	194	156	292	189	170

Исследование температурного поля с помощью тепловизора показало, что температурный градиент по толщине стенки образца на поверхности нормальных каналов меньше, чем у наклонных, в которых перепад температуры составлял более  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о существенном ( $\sim 5$  раз) снижении термоциклической долговечности моделей жаровых труб с каналами, расположенными к поверхности под углом  $35^\circ$ , по сравнению с каналами, расположенными под углом  $90^\circ$ .

Результаты испытаний моделей жаровых труб с отверстиями для подвода охлаждающего воздуха диаметром 1, 1,5 и 2 мм перпендикулярно к поверхности свидетельствуют о незначительном изменении термоциклической долговечности при изменении диаметра отверстий (менее 20%).

Численное решение задачи оценки усталостной долговечности модели образцов жаровой трубы из сплава ВЖ-159 при термоциклическом нагружении было проведено в три этапа путем последовательного решения задач:

- электромагнитной задачи, основанной на уравнениях Максвелла [18];
- нестационарной задачи, основанной на решении уравнения теплопроводности [15, 16];
- задачи оценки усталостной долговечности модели жаровой трубы камеры сгорания при блочном термоциклическом нагружении в условиях неоднородного напряженного состояния [6, 10–12].

На первом этапе определено распределение внутренних источников тепла (удель-

ной мощности нагрева) по толщине жаровой трубы. Полученное распределение внутренних источников тепла является нестационарным (зависящим от времени нагрева). В процессе решения связанных электромагнитной и тепловой задач на каждом шаге расчета из модуля решения тепловой задачи значения текущей температуры передавались в модуль решения электромагнитной задачи для корректировки электрофизических свойств материала.

На втором этапе с применением расчетного кода ANSYS исследовалось нестационарное тепловое состояние охлаждаемого изделия с учетом параметров термоцикла. Граничные условия для решения задачи теплопроводности: температура окружающей среды  $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи окружающего воздуха  $\alpha_T^{(0)} = 25\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , коэффициент теплоотдачи охлаждающего воздуха внутри жаровой трубы  $\alpha_T^{(1)} = 1900\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , удельная мощность нагрева  $q = 9\cdot 10^5\text{ Вт}/\text{м}^2$  (получена из решения электромагнитной задачи). Минимальная и максимальная температуры нагрева поверхности детали в термоцикле составляют соответственно  $T_{\min} = 350\text{ }^\circ\text{C}$  и  $T_{\max} = 900\text{ }^\circ\text{C}$ . Численный анализ температурного поля объекта для режима  $T_{\max} = 900\text{ }^\circ\text{C}$  на перфорированной поверхности показал, что температурный градиент вблизи нормальных каналов меньше, чем у наклонных. На рис. 2 видно, что температурное поле по толщине объекта неоднородно и перепад температуры вблизи нормальных каналов составляет  $164,5\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 2а), в то время как этот показатель для наклонных каналов –  $264,3\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 2б), что соответствует экспериментальным данным [17].

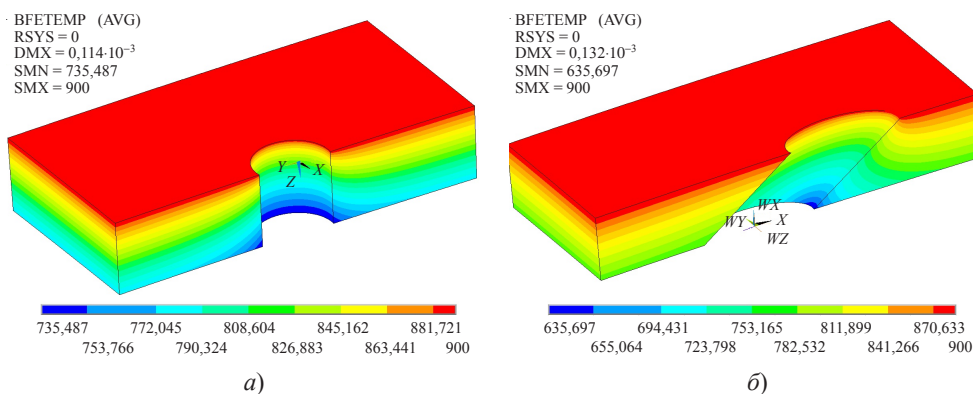


Рис. 2

На третьем этапе с использованием рассчитанных температурных полей объекта и определяющих соотношений МПС [6, 10–12] численно решена задача оценки термоциклической долговечности моделей жаровой трубы с различными углами наклона охлаждающих каналов.

Физико-механические характеристики жаропрочного сплава ВЖ-159 [18, 19] и материальные параметры модели МПС [6, 10–12] приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Параметры модели термопластичности жаропрочного сплава ВЖ-159

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Модули кинематического упрочнения		Модуль изотропного упрочнения $q_1, \text{МПа}$	Начальный радиус поверхности текучести $C_p^0, \text{МПа}$
	$g_1^p, \text{МПа}$	$g_2^p$		
20	115000	780	2430	510
350	107000	750	2380	480
650	80000	600	2200	370
800	72000	700	1600	250
850	51800	890	1360	80
900	19700	1000	300	25
1000	16900	1200	250	20

Таблица 3

Материальные параметры эволюционного уравнения накопления повреждений жаропрочного сплава ВЖ-159

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Значение энергии повреждения, соответствующее образованию макротрещины $W_p^f, \text{МДж/м}^3$	Параметры уравнения накопления повреждений при МЦУ	
		$\alpha_p$	$r_p$
20	50	1	0,3
350	49	1	0,3
800	40	1	0,3
850	5	1	0,3
900	0,5	1	0,3

На рис. 3 приведено распределение интенсивности напряжений (МПа), а на рис. 4 – распределение интенсивности пластических деформаций фрагмента модели жаропрочной трубы с перфорированными отверстиями в районе одного из каналов для второго цикла нагружения в случае нормального ( $\beta = 90^\circ$ ) и наклонного ( $\beta = 35^\circ$ ) охлаждающих отверстий (соответственно рис. 3а, 4а и рис. 3б, 4б).

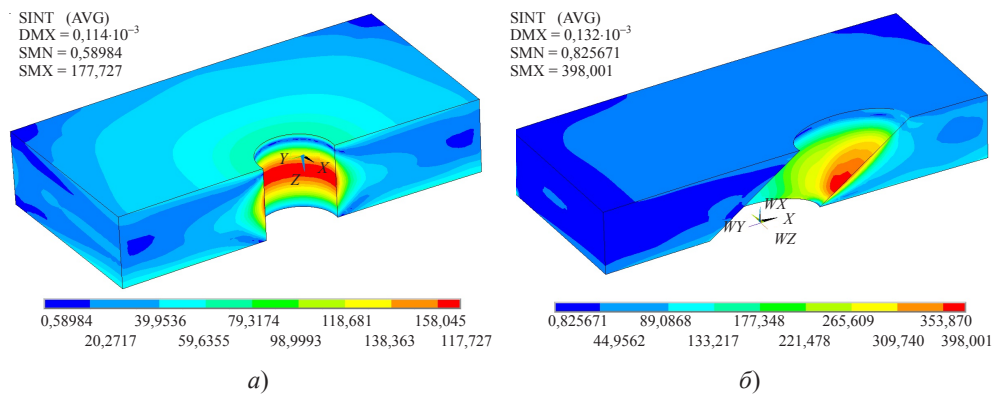


Рис. 3

Видно, что максимальные значения интенсивности напряжений наблюдаются внутри стенки жаровой трубы, в то время как максимальные значения интенсивности пластических деформаций наблюдаются вблизи наружной разогретой кромки

поверхности канала, где процессы накопления повреждений происходят наиболее интенсивно (наличие макроскопических трещин в эксперименте [17] наблюдалось именно в этом месте). Различие местоположения вышеуказанных характерных зон объясняется, по-видимому, существенной зависимостью физико-механических свойств сплава от температуры и заневоливанием тонкой наружной разогретой поверхности охлаждающего канала более жесткой холодной частью стенки.

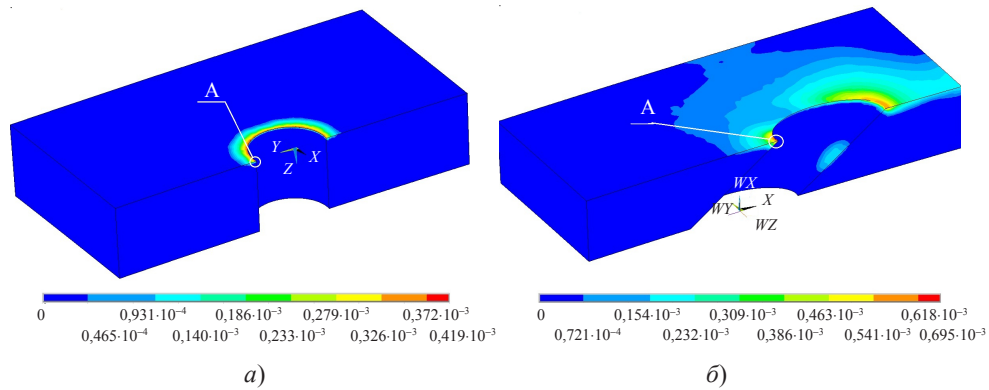


Рис. 4

Анализ результатов расчета кинетики НДС показал, что в наиболее нагруженной зоне (точка А на рис. 4) реализуется напряженное состояние, близкое к плоскому напряженному состоянию.

На рис. 5 представлены зависимости изменения температуры и значений компонент тензора полных деформаций в наиболее нагруженной зоне от числа шагов нагружения  $n$  для двух углов наклона охлаждающих каналов (рис. 5а –  $\beta = 90^\circ$ , рис. 5б –  $\beta = 35^\circ$ ).

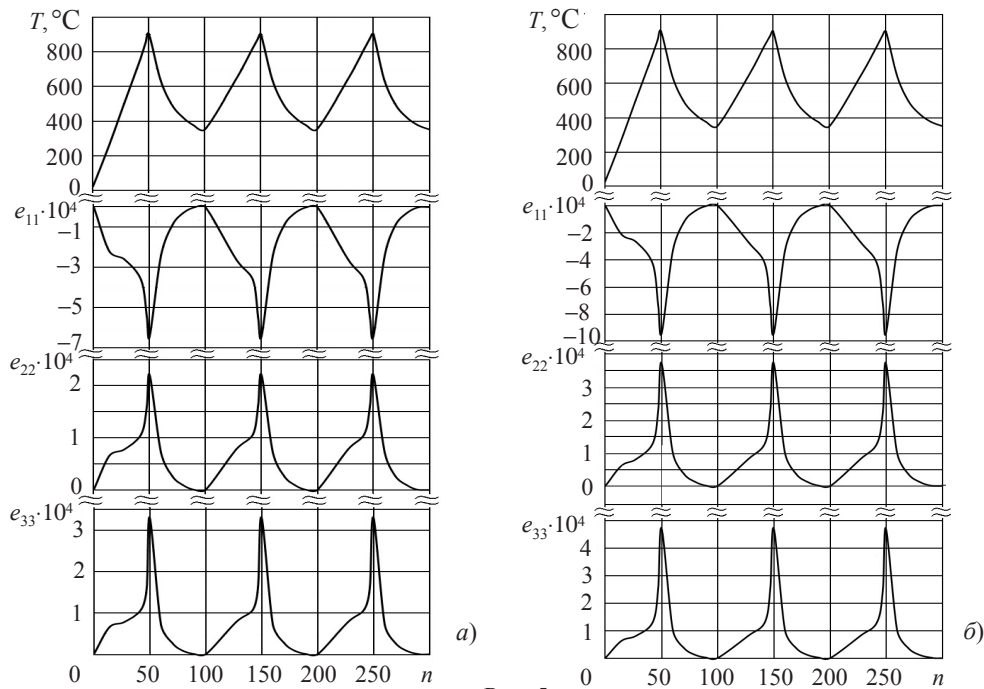


Рис. 5



Видно, что компоненты тензора деформаций  $e_{11}$  по отношению к  $e_{22}$  и  $e_{33}$  изменяются в противофазе, изменение температуры  $T$  по отношению к  $e_{11}$  также происходит в противофазе.

На рис. 6–9 для наиболее нагруженной зоны (точка А на рис. 4) приведены петли циклического гистерезиса для десяти циклов термоциклического нагружения по режиму  $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max}$  ( $350 \leftrightarrow 900$  °С) и двух углов наклона каналов ( $a$  – для  $\beta = 90^\circ$ ,  $b$  – для  $\beta = 35^\circ$ ):  $\sigma_{11} \sim e_{11}$  (рис. 6),  $\sigma_{22} \sim e_{22}$  (рис. 7),  $\rho_{11}^p \sim e_{11}^p$  (рис. 8) и  $\rho_{22}^p \sim e_{22}^p$  (рис. 9), рассчитанные с использованием ПС EXPMODEL [20].

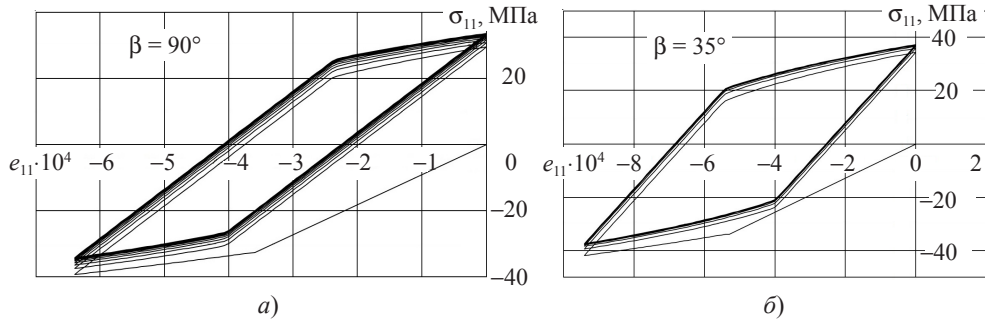


Рис. 6

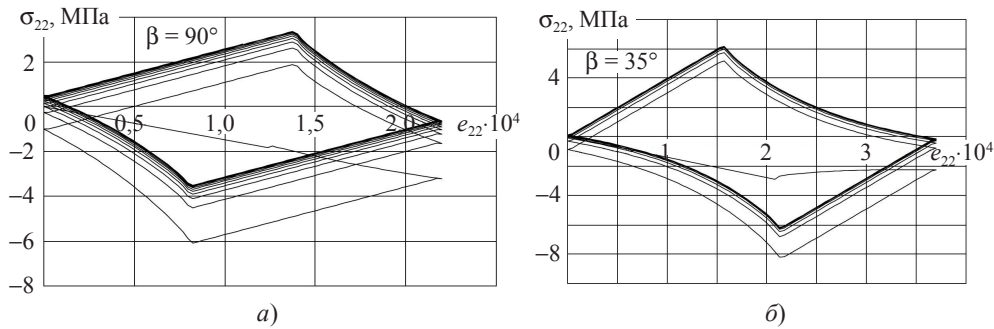


Рис. 7

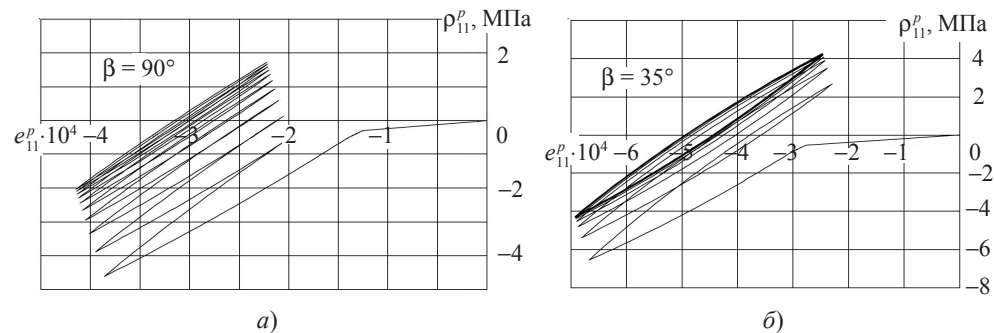


Рис. 8

На рис. 10 для точки А показаны траектории нагружения (зависимости компонент тензора напряжений  $\sigma_{11} \sim \sigma_{22}$ ) для двух углов наклона охлаждающих каналов: для  $\beta = 90^\circ$  (рис. 10а) и для  $\beta = 35^\circ$  (рис. 10б). Вид графиков (см. рис. 6–10) показывает наличие вращения главных площадок тензоров и деформаций (непропорциональность изменения компонент тензоров напряжений и деформаций) и несоос-

ность тензоров напряжений, микронапряжений, полных и пластических деформаций.

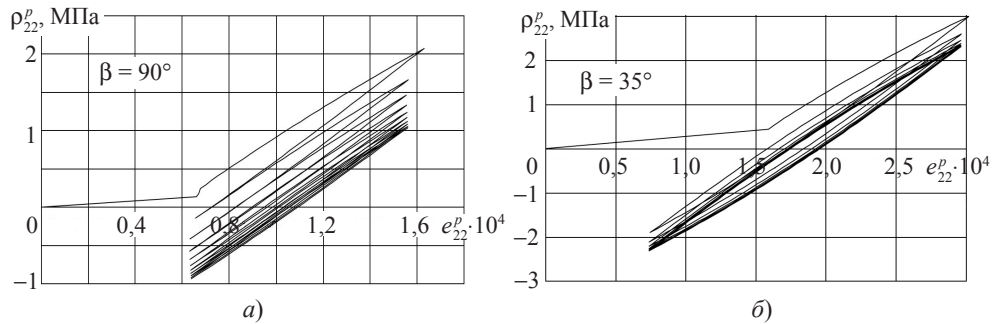


Рис. 9

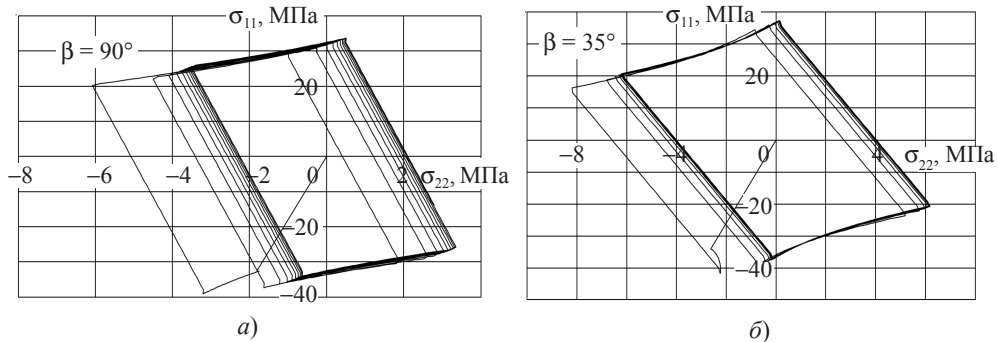


Рис. 10

Интегрирование эволюционных уравнений накопления усталостных повреждений [6, 10–12] в точке А материала позволяет исследовать влияние угла наклона охлаждающих каналов на термическую усталость модели жаровой трубы камеры сгорания. Численные результаты сравнивались с имеющимися опытными данными [17].

Результаты расчетов и их сравнение с имеющимися опытными данными приведены на рис. 11 и в таблице 1. На рис. 11 показаны зависимости величины повреждения  $\omega$  от числа циклов нагружения для двух углов наклона перфорированных отверстий (а – для  $\beta = 90^\circ$ , б – для  $\beta = 35^\circ$ ).

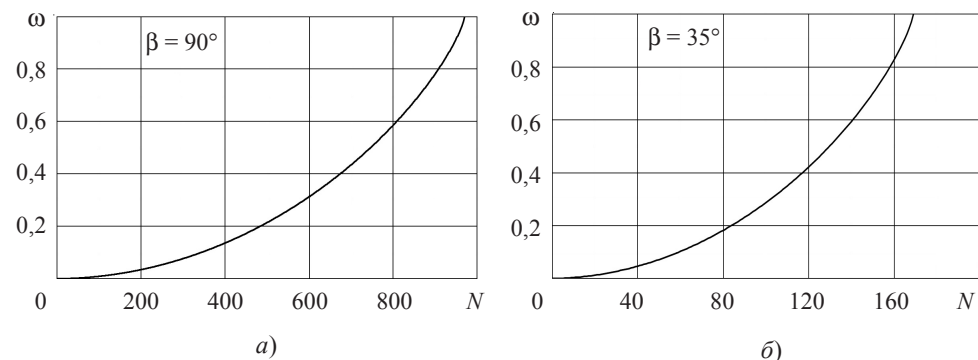


Рис. 11

В таблице 1 приведено число циклов до разрушения, полученное экспериментально и расчетным путем для двух углов наклона охлаждающих каналов. Видно качественное и необходимое для проведения инженерных расчетов количественное соответствие опытных и расчетных данных.

Таким образом, сравнение численных и экспериментальных результатов термоциклической долговечности моделей жаровых труб камер сгорания ГТД с различными углами наклона охлаждающих каналов в условиях неаодносного напряженного состояния при блочных режимах термоциклического нагружения позволяет сделать вывод о достоверности определяющих соотношений модели МПС [6, 10–12] при термической усталости и возможности эффективного использования развитых определяющих соотношений МПС для оценки термоциклической усталости материалов и конструкций.

### Заклучение

Проведена оценка достоверности модели поврежденной среды [6, 10–12] путем сопоставления результатов численных расчетов с известными из литературы опытными данными по термической усталостной долговечности моделей жаровых труб камер сгорания ГТД с различными углами наклона охлаждающих каналов при блочном термоциклическом нагружении в условиях неоднородного напряженного состояния, которые подтверждают правильность моделирования процессов сложного термоциклического деформирования и усталостной долговечности материалов и конструкций.

Показано, что уменьшение угла наклона перфорированных отверстий в жаровых трубах камер сгорания из сплава ВЖ-159 с  $\beta = 90^\circ$  до  $\beta = 35^\circ$  сопровождается снижением их термоциклической долговечности приблизительно в 5 раз.

### Список литературы

1. Митенков Ф.М., Кайдалов В.Б., Коротких Ю.Г. и др. *Методы обоснования ресурса ЯЭУ*. М.: Машиностроение, 2007. 445 с.
2. Lemaitre J. Continuous damage mechanics model for ductile fracture. *J. Eng. Mater. Technol.* 1985. Vol. 107. No 1. P. 83–89. doi: 10.1115/1.3225775.
3. Murakami S., Imaizumi T. Mechanical description of creep damage and its experimental verification. *J. Мéc. Théor. Appl.* 1982. Vol. 1. P. 743–761.
4. Коллинз Дж. *Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение*. М.: Мир, 1984. 624 с.
5. Chaboche J.L. Continuous damage mechanics a tool to describe phenomena before crack initiation. *Engineering Design*. 1981. Vol. 64. P. 233–247.
6. Волков И.А., Коротких Ю.Г. *Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями*. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
7. Hulford G.R. *Low cycle thermal fatigue. Mechanics and mathematical methods. Thermal stress II. Chapter 6*. Elsevier Science Publishers B.V. 1987. P. 329–428.
8. Корум, Сартори. Оценка современной методологии проектирования высокотемпературных элементов конструкций на основе экспериментов по их разрушению. *Теоретические основы инженерных расчетов*. 1988. №1. С. 104–118.
9. Гусенков А.П., Казанцев А.Г. Прочность при малоцикловом и длительном циклическом нагружении и нагреве. *Машиноведение*. 1979. №3. С. 59–65.
10. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Тарасов И.С. Моделирование сложного пластического деформирования и разрушения металлов при многоосном непропорциональном нагружении. *ПМТФ*. 2009. Т. 50. №5. С. 193–205.

11. Шишулин Д.Н., Волков И.А., Казаков Д.А., Пичков С.Н. Моделирование основных закономерностей процесса деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах на базе концепции механики поврежденной среды. *Проблемы прочности и пластичности*. 2012. Вып. 74. С. 16–27.
12. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов усталостной долговечности материалов и конструкций при малоцикловом нагружении. *Изв. РАН. Механика твердого тела*. 2014. №3. С. 66–78.
13. Коротких Ю.Г., Волков И.А., Игумнов Л.А., Шишулин Д.Н., Тарасов И.С. Моделирование процессов неупругого деформирования и разрушения жаропрочных сплавов при циклическом термомеханическом нагружении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2015. Т. 77. №4. С. 329–343.
14. Коротких Ю.Г., Волков И.А., Игумнов Л.А., Шишулин Д.Н., Гусева М.А. Моделирование сложного пластического деформирования и накопления усталостных повреждений в жаропрочных сплавах при комбинированном термомеханическом нагружении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №1. С. 45–59.
15. Волков И.А., Игумнов Л.А., Шишулин Д.Н., Тарасов И.С., Гусева М.А. Оценка усталостной долговечности компактного образца с концентраторами при термоциклическом нагружении в условиях неоднородного напряженного состояния. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №3. С. 333–349.
16. Бычков Н.Г., Лепешкин 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.
17. Бычков Н.Г., Лепешкин 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.
18. Лепешкин А.Р., Бычков Н.Г., Першин А.В. Теплофизические измерения при термодублировании лопаток газотурбинных двигателей с керамическими покрытиями. *Теплофизика высоких температур*. 2010. Т. 48. №5. С. 734–740.
19. Капустин С.А., Казаков Д.А., Чурилов Ю.А., Галущенко А.И., Вахтеров А.М. Экспериментально-теоретическое изучение поведения изделий из жаропрочного сплава в условиях высокотемпературной ползучести. *Проблемы прочности и пластичности*. 2008. Вып. 70. С. 98–108.
20. Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г., Казаков Д.А., Емельянов А.А., Тарасов И.С., Гусева М.А. Программная реализация процессов вязкопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных сплавах при термомеханическом нагружении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №2. С. 188–207.

#### References

1. Mitenkov F.M., Kaidalov V.B., Korotkikh Yu.G. et al. *Metody obosnovaniya resursa YaEU [Methods of Substantiation of NPP Resource]*. Moscow. Mashinostroenie Publ. 2007. 445 p. (In Russian).
2. Lemaitre J. Continuous damage mechanics model for ductile fracture. *J. Eng. Mater. Technol.* 1985. Vol. 107. No 1. P. 83–89. doi: 10.1115/1.3225775.
3. Murakami S., Imaizumi T. Mechanical description of creep damage and its experimental verification. *J. Méc. Théor. Appl.* 1982. Vol. 1. P. 743–761.
4. Callins J.A. *State Equation for Viscoelastoplastic Media with Injuries*. NY – Chichester – Brisbane – Toronto – Singapore. 1981. 624 p.
5. Chaboche J.L. Continuous damage mechanics a tool to describe phenomena before crack initiation. *Engineering Design*. 1981. Vol. 64. P. 233–247.
6. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. *Uravneniya sostoyaniya vyazkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami [Equations of State of Viscoelastoplastic Media with Damages]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2008. 424 p. (In Russian).
7. Hulford G. R. *Low cycle thermal fatigue. Mechanics and mathematical methods. Thermal stress II. Chapter 6*. Elsevier Science Publishers B.V. 1987. P. 329–428.

8. Korum, Satori. Otsenka sovremennoy metodologii proektirovaniya vysokotemperaturnykh elementov konstruktsey na osnove eksperimentov po ikh razrusheniyu [Evaluation of modern methodology for designing high-temperature structural elements based on experiments on their destruction]. *Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov* [Journal of Engineering for Industry. Transactions of the ASME. Series B]. 1988. No 1. P. 104–118 (In Russian).

9. Gusenkov A.P., Kazantsev A.G. Prochnost pri malotsiklovom i dlitelnom tsiklicheskom nagruzhenii i nagreve [Strength at low-cycle and long cyclic loading and heating]. *Mashinovedenie* [Machine Science]. 1979. No 3. P. 59–65 (In Russian).

10. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G., Tarasov I.S. Modelirovanie slozhnogo plasticheskogo deformirovaniya i razrusheniya metallov pri mnogoosnom neproportsionalnom nagruzhenii [Modeling complex plastic deformation and fracture of metals under disproportionate loading]. *PMTF* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]. 2009. Vol. 50. No 5. P. 193–205 (In Russian).

11. Shishulin D.N., Volkov I.A., Kazakov D.A., Pichkov S.N. Modelirovanie osnovnykh zakonomernostey protsessa deformirovaniya i nakopleniya povrezhdeniy v konstruktсионnykh materialakh na baze kontseptsii mekhaniki povrezhdennoy sredy [Modeling the basic laws of the process of deformation and damage accumulation in structural materials based on the concept of the mechanics of damaged media]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2012. Iss. 74. P. 16–27 (In Russian).

12. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. Modelirovanie protsessov ustalostnoy dolgovechnosti materialov i konstruktsey pri malotsiklovom nagruzhenii [Modeling of fatigue life of materials and structures under low-cycle loading]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela* [Mechanics of Solids]. 2014. Vol. 49. No 3. P. 290–301 (In Russian).

13. Korotkikh Yu.G., Volkov I.A., Igumnov L.A., Shishulin D.N., Tarasov I.S. Modelirovanie protsessov neuprugogo deformirovaniya i razrusheniya zharoprochnykh splavov pri tsiklicheskom termomekhanicheskom nagruzhenii [Modeling processes of inelastic deformation and failure of heat-resistant alloys under cyclic thermal-mechanical loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2015. Vol. 77. No 4. P. 329–343 (In Russian).

14. Korotkikh Yu.G., Volkov I.A., Igumnov L.A., Shishulin D.N., Guseva M.A. Modelirovanie slozhnogo plasticheskogo deformirovaniya i nakopleniya ustalostnykh povrezhdeniy v zharoprochnykh splavakh pri kombinirovannom termomekhanicheskom nagruzhenii [Modeling complex plastic deformation and fatigue damage accumulation in heat-resistant alloys under combined thermal-mechanical loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2016. Vol. 78. No 1. P. 45–59 (In Russian).

15. Volkov I.A., Igumnov L.A., Shishulin D.N., Tarasov I.S., Guseva M.A. Otsenka ustalostnoy dolgovechnosti kompaktnogo obraztsa s kontsentratorami pri termotsiklicheskom nagruzhenii v usloviyakh neodnorodnogo napryazhennogo sostoyaniya [Assessment of the fatigue life of the compact sample concentrators at temperature cycling conditions of loading in inhomogeneous stress state]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2016. Vol. 78. No 3. P. 333–349 (In Russian).

16. 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 zashchitnymi pokrytiyami s ispol'zovaniem 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).

17. 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).

18. Lepeshkin A.R., Bychkov N.G., Pershin A.V. Teplofizicheskie izmereniya pri termotsiklirovaniy lopatok gazoturbinykh dvigateley s keramicheskimi pokrytiyami [Thermo-physical measurements during thermal cycling of gas turbine engine blades with ceramic coatings]. *Teplofizika*

*vysokikh temperatur* [High Temperature]. 2010. Vol. 48. No 5. P. 699–705 (In Russian).

19. Kapustin S.A., Kazakov D.A., Churilov Yu.A., Galushchenko A.I., Vakhterov A.M. Eksperimentalno-teoreticheskoe izuchenie povedeniya izdeliy iz zharoprochnogo splava v usloviyakh vysokotemperaturnoy polzuchesti [Experimental-theoretical study of the behavior of structural parts of heat-resistant alloy under high-temperature creep]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2008. Iss. 70. P. 98–108 (In Russian).

20. Volkov I.A., Igumnov L.A., Korotkikh Yu.G., Kazakov D.A., Yemelyanov A.A., Tarasov I.S., Guseva M.A. Programmnaya realizatsiya protsessov vyazkoplasticheskogo deformirovaniya i nakopleniya povrezhdeniy v konstruktsionnykh splavakh pri termomekhanicheskom nagruzhenii [Software implementation of viscoplastic deformation and damage accumulation processes in structural alloys under thermal-mechanical loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2016. Vol. 78. No 2. P. 188–207 (In Russian).

## NUMERICAL ANALYSIS OF THERMAL-CYCLIC LIFE OF MODELS OF THE FLUE TUBE WITH VARIOUS INCLINATIONS OF THE COOLING CHANNELS

Volkov I.A.<sup>1,2</sup>, Igumnov L.A.<sup>2</sup>, Shishulin D.N.<sup>3</sup>, Tarasov I.S.<sup>1</sup>, Guseva M.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Volga State University of Water Transport, Nizhni Novgorod, Russian Federation

<sup>2</sup>Research Institute of Mechanics University of Nizhni Novgorod,  
Nizhni Novgorod, Russian Federation

<sup>3</sup>Nizhni Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,  
Nizhni Novgorod, Russian Federation

The issue of evaluating strength and service life of critical engineering objects, whose exploitation properties are characterized by multi-parametric nonstationary thermal-mechanical effects, is discussed. Basic degradation mechanisms of structural materials (metals and alloys) characteristic of such objects are considered. The main criteria for mathematical models of fatigue damage accumulation are formulated.

Based on the developed version of defining equations of damaged medium mechanics, the effect of the angle of inclination of the cooling channels on thermal-cyclic life of the models of flue tubes of combustion chambers gas turbine engines is numerically analyzed. Special attention is paid to studying the processes of complex thermal-cyclic deformation and fatigue damage accumulation, accompanied by rotation of the main sites of stress tensors, complete and plastic deformations, as well as the processes of fatigue damage accumulation. Comparison of the obtained numerical results with experimental data shows that the developed model of damaged medium mechanics adequately and accurately enough for engineering calculations quantitatively describes experimental data and can be effectively used for evaluating thermal-cyclic life of materials and structures under multiaxial non-proportional modes of thermal-cyclic loading.

*Keywords:* thermal-cyclic life, damaged medium mechanics, complex deformation, models of flue tubes, cooling channel, inclination, macroscopic crack, strength, fracture.