

УДК 539.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ  
УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВАХ  
ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ  
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ\***

© 2016 г.

**Коротких Ю.Г.<sup>1,2</sup>, Волков И.А.<sup>1</sup>, Игумнов Л.А.<sup>2</sup>,  
Шишулин Д.Н.<sup>3</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  
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 24.02.2016*

Рассматриваются основные физические закономерности сложного термопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в конструкционных материалах (металлах и их сплавах) при различных режимах комбинированного термомеханического нагружения. Приводятся результаты численного моделирования циклического термопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в жаропрочных сплавах (Haynes 188) при комбинированном термомеханическом нагружении. Особое внимание уделяется вопросу моделирования процессов циклического термопластического деформирования и накопления усталостных повреждений для сложных процессов деформирования, сопровождающихся вращением главных площадок тензоров напряжений и деформаций. Показано, что использованная модель поврежденной среды с достаточной для инженерных расчетов точностью описывает процессы циклического изотермического и неизотермического деформирования и накопления усталостных повреждений при комбинированном термомеханическом нагружении и позволяет рассчитывать малоцикловую усталостную долговечность жаропрочных сплавов при произвольных траекториях деформирования.

*Ключевые слова:* моделирование, термоциклическая прочность, сложное деформирование, механика поврежденной среды, усталостная долговечность, прочность, разрушение, ресурс.

---

\* Выполнено при финансировании Российским научным фондом (грант № 14-19-01096).

## Введение

Тенденция развития конструкций и аппаратов современного машиностроения характеризуется увеличением их рабочих параметров, снижением металлоемкости за счет оптимального проектирования и применения новых высокопрочных материалов, значительным ростом удельного веса нестационарных режимов нагружения. Увеличиваются требования к надежности и длительности безаварийной эксплуатации как конструкций в целом, так и отдельных их элементов. Указанные тенденции привели к тому, что в настоящее время одной из актуальных задач проектирования и эксплуатации конструкций и аппаратов новой техники является задача надежной оценки их ресурса. Эта задача особенно актуальна для объектов, срок службы которых составляет несколько десятков лет (атомные энергетические установки, авиационные газотурбинные двигатели, ракетные двигатели и др.). Как правило, эксплуатационные условия работы таких конструкций и аппаратов современной техники характеризуются многопараметрическими нестационарными термосиловыми нагрузками, воздействиями внешних полей, приводящими к деградации начальных прочностных свойств конструкционных материалов и, в конечном итоге, к исчерпанию ресурса материала конструктивных узлов объекта [1–12].

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

Циклическое неизотермическое деформирование материала, в отличие от изотермического деформирования, представляет собой несбалансированный циклический процесс. Степень дисбаланса является функцией диапазона температурного цикла и сдвига фаз изменения температуры и деформации. Даже в упругой области цикла растяжения-сжатия вследствие зависимости модуля упругости от температуры (нелинейная убывающая функция растущей температуры) процесс деформирования зависит от фазы изменения температуры и механической деформации, является жестким в конце холодного температурного цикла и более податливым на высокотемпературном конце [1]. При неизотермическом упругопластическом деформировании процесс деформирования будет иметь более сложный характер вследствие зависимости упругопластического поведения материала от температуры.

Объемная температурная деформация в большинстве случаев приводит к многоосному процессу деформирования, а это приводит к новым источникам дисбаланса: напряженно-деформированное состояние (НДС) в любой точке цикла отличается от НДС в других точках. Фазирование изменением температуры и механической деформации является одним из важнейших факторов, связанных и с температурной усталостью.

Многоосность НДС также является источником дисбалансов в термомеханических нагружениях. При одновременном механическом и температурном воздействии, как правило, возникает значительное вращение главных площадок тензоров напряжений и деформаций (непропорциональное нагружение), которое при наличии пластического деформирования приводит к несоосности тензоров напряжений,

полных и пластических деформаций. Для моделирования таких процессов необходимо иметь соответствующие модели циклической термопластичности.

Неизотермическое деформирование конструкционных материалов по сравнению с изотермическим деформированием характеризуется рядом специфических особенностей [1]:

- нелинейной зависимостью напряжение–деформация даже в упругой области вследствие зависимости модулей упругости от температуры;

- неуравновешенностью диаграмм при симметричных циклах изменения механической деформации и сильной зависимостью формы петли гистерезиса напряжение–деформация от сочетания фаз изменения температуры и механической деформации.

Термомеханическое усталостное циклирование может инициировать механизмы повреждения, которые не развиваются при изотермической усталости. Основными параметрами, определяющими темпы роста процессов термомеханической усталости, являются: перепад температур (температурные градиенты), максимальная температура цикла, геометрические характеристики и условия закрепления элементов конструкций, физико-механические характеристики материалов (особенно коэффициент линейного расширения), неоднородность (анизотропность) конструктивной композиции материалов.

В статье [9] приведены результаты экспериментальных исследований на неизотермическую малоцикловую усталость цилиндрических образцов из стали 1070. Образцы подвергались циклическому нагреву в диапазоне температур  $T = 350\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$  при полном или частичном ограничении температурной деформации и с наложением дополнительной механической деформации. Результаты испытаний показали, что в указанном диапазоне температур термомеханическая усталостная долговечность значительно ниже изотермической усталостной долговечности, полученной при комнатной температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Снижение усталостной долговечности при неизотермическом термомеханическом нагружении происходит в результате действия дополнительных механизмов деградации начальных прочностных свойств материалов, которые отсутствуют при изотермических циклических нагружениях (металлургические изменения структуры материала, дополнительное деформационное старение, усиление влияния окружающей среды и др.).

Изучение влияния фазности изменения температурной и механической деформации [7] показывает, что наименьшая долговечность, как правило, наблюдается тогда, когда максимальная температура температурного цикла достигается в полцикле растяжения по механической деформации, а минимальная – в полцикле сжатия, хотя отдельные материалы (например, сталь 15Х2МФА при  $T \leq 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) демонстрируют нечувствительность к фазности изменения температуры и механической деформации.

В [3] представлены результаты сопоставления экспериментальных данных по изотермической малоцикловой усталости стали АJSJ типа 347 при повышенных температурах ( $T = 350, 500$  и  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и данных неизотермических усталостных испытаний при циклическом нагреве от  $T_{\min} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $T_{\max} = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  со средним значением температурного цикла  $T_{\text{mid}} = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Из анализа результатов испытаний следует, что при одинаковом размахе пластической деформации (одноосное растяжение–сжатие) усталостная долговечность при неизотермическом нагружении на порядок меньше изотермической усталости при средней температуре цикла

$T_{\text{mid}} = 350^\circ\text{C}$  и меньше изотермической усталостной долговечности при температуре  $T = 600^\circ\text{C}$ , на  $100^\circ\text{C}$  превышающей  $T_{\text{max}}$  температурного цикла.

Таким образом, несмотря на большое внешнее сходство явлений изотермической и неизотермической усталости, использовать результаты изотермической малоцикловой усталости для оценки неизотермической усталостной долговечности следует с большой осторожностью.

Повреждение и разрушение материалов в основном обусловлено зарождением микродефектов, их ростом и слиянием в макроскопические трещины. Задачи описания механического поведения этих микродефектов не менее важны, чем задачи развития макродефектов (трещин). В последние годы для решения таких задач успешно развивается новое научное направление – механика поврежденной среды (МПС) [8, 13–19].

В работах [13–16] с современных позиций МПС развита математическая модель, описывающая процессы циклического вязкопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в конструкционных материалах (металлах и их сплавах) при многоосных непропорциональных путях комбинированного термомеханического нагружения. В [8] приведены результаты численного моделирования циклического термопластического деформирования и накопления повреждений в жаропрочных сплавах (Nimonic 80A) при синфазном и противофазном циклических термомеханических нагружениях [10]. В настоящей статье в целях качественной и количественной оценки модели приведены результаты исследования влияния законов изменения механической деформации и температуры (вида траектории деформирования) на усталостную долговечность жаропрочного сплава Haynes 188 [11] при непропорциональных режимах термомеханического нагружения [12].

### Численные результаты

Ниже представлены результаты сопоставления численных и экспериментальных данных по термоциклическому деформированию тонкостенных трубчатых образцов из жаропрочного кобальтового сплава Haynes 188 в интервале температур  $316\text{--}760^\circ\text{C}$ . Изотермические и неизотермические эксперименты проведены при жестком нагружении: амплитуда осевой деформации  $e_{11}$  составляла  $0,4\%$ , а амплитуда сдвиговой деформации  $e_{12} = 0,9\%$  [12].

В экспериментах [12] варьировались:

– угол сдвига фаз  $\theta$  между осевой деформацией  $e_{11}$  и деформацией сдвига  $e_{12}$  (при изотермическом деформировании при  $\theta = 0$  – пропорциональное нагружение; при  $\theta = 90^\circ$  осевая и сдвиговая деформации меняются в противофазе);

– угол сдвига фаз  $\psi$  между амплитудами осевой деформации  $e_{11}$  и температурой  $T$  (при неизотермическом нагружении при  $\psi = 0$  осевая деформация и температура меняются в фазе, при  $\psi = 180^\circ$  – в противофазе).

В [12] при сложном изотермическом и неизотермическом деформировании реализовано восемь типов испытаний:

– эксперимент И316МФ: механические деформации меняются в фазе ( $\theta = 0$ ), температура  $T = 316^\circ\text{C}$  постоянная (изотермические испытания);

– эксперимент И316МПФ: механические деформации меняются в противофазе ( $\theta = 90^\circ$ ), температура  $T = 316^\circ\text{C}$  постоянная (изотермические испытания);

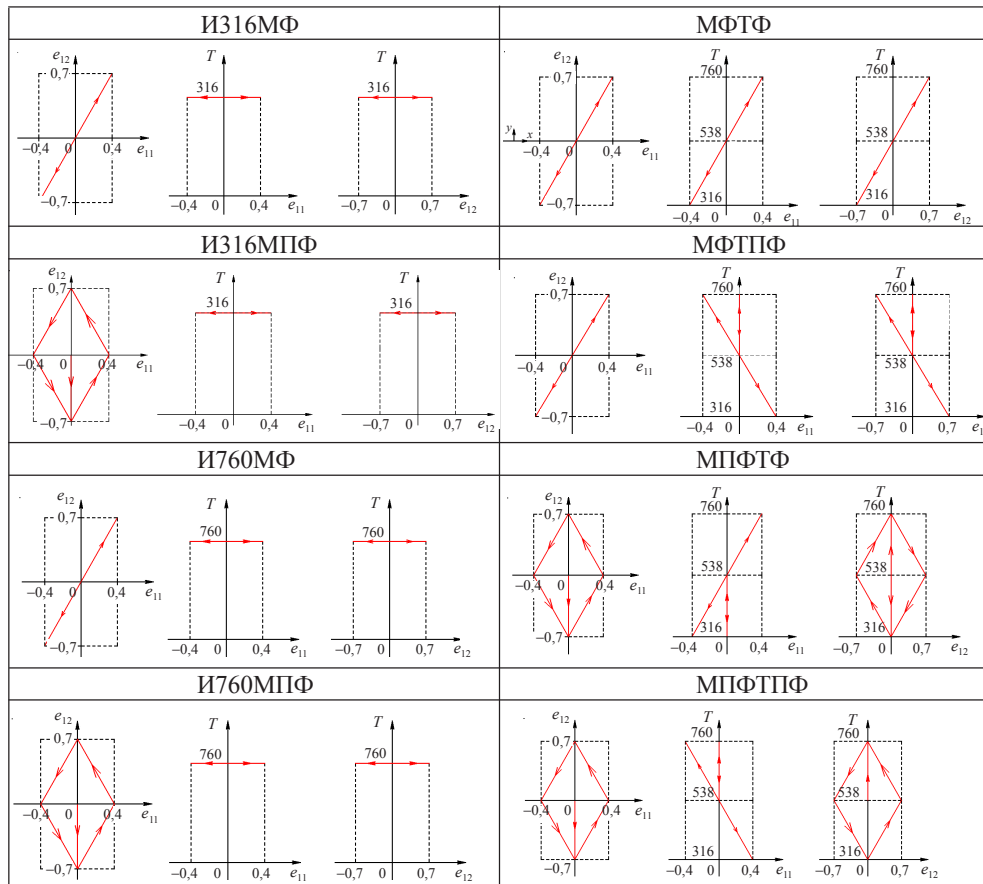
– эксперимент И760МФ: механические деформации меняются в фазе ( $\theta = 0$ ), температура  $T = 760^\circ\text{C}$  постоянная (изотермические испытания);

- эксперимент И760МПФ: механические деформации меняются в противофазе ( $\theta = 90^\circ$ ), температура  $T = 760^\circ\text{C}$  постоянная (изотермические испытания);
- эксперимент МФТФ: механические деформации и температура меняются в фазе ( $\theta = 0$  и  $\psi = 0$ ) – неизотермические испытания;
- эксперимент МФТПФ: механические деформации меняются в фазе, а температура в противофазе ( $\theta = 0$  и  $\psi = 180^\circ$ ) – неизотермические испытания;
- эксперимент МПФТФ: механические деформации меняются в противофазе, а температура в фазе ( $\theta = 90^\circ$  и  $\psi = 0$ ) – неизотермические испытания;
- эксперимент МПФТПФ: механические деформации и температура меняются в противофазе ( $\theta = 90^\circ$  и  $\psi = 180^\circ$ ) – неизотермические испытания.

Задавая различные законы изменения осевой деформации  $e_{11}$ , деформации сдвига  $e_{12}$  и температуры  $T$ , можно реализовать различные траектории деформирования (таблица 1).

Таблица 1

Законы изменения осевой деформации  $e_{11}$  [%], сдвиговой деформации  $e_{12}$  [%] и температуры  $T$  [ $^\circ\text{C}$ ] (траектории деформирования)



Физико-механические характеристики жаропрочного кобальтового сплава Naupes 188 [11] и материалы параметры модели поврежденной среды [13–16] приведены в таблицах 2–4.

**Таблица 2**  
**Физико-механические характеристики и параметры модели**

Характеристики	Температура $T$	
	316 °C	760 °C
$K$ , МПа	167916	138400
$G$ , МПа	77500	63680
$\alpha$ , 1/град	$1,319 \cdot 10^{-5}$	$1,531 \cdot 10^{-5}$
$C_p^0$ , МПа	295	260
$g_1$ , МПа	18170	15770
$g_2$	182,74	182,67
$a$	4	4
$W_p^f$ , МДж/м <sup>3</sup>	1481	201

**Таблица 3**  
**Значение модуля монотонного изотропного упрочнения  $q_1$  [МПа]**  
**в зависимости от длины траектории пластического деформирования**  
**на монотонных участках  $\chi_m$**

$T = 316 \text{ }^\circ\text{C}$									
$\chi_m$	0	0,0002	0,0004	0,0005	0,001	0,002	0,003	0,005	0,01
$q_1$	-2401	-2716	-3032	-3190	-3979	-5296	-6089	-6186	-2133
$T = 760 \text{ }^\circ\text{C}$									
$\chi_m$	0	0,0002	0,0004	0,0005	0,001	0,002	0,003	0,005	0,01
$q_1$	-2124	-2129	-2135	-2138	-2152	-2470	-3367	-5207	-1471

**Таблица 4**  
**Значение модуля циклического упрочнения  $Q_1$  [МПа]**  
**в зависимости от величины максимального значения**  
**смещения центра поверхности текучести  $\rho_{\max}$  [МПа]**

$T = 316 \text{ }^\circ\text{C}$			
$\rho_{\max}$	24,35	46,81	49,16
$Q_1$	520	520	500
$T = 760 \text{ }^\circ\text{C}$			
$\rho_{\max}$	43,88	46,51	60,75
$Q_1$	350	440	330

На рис. 1 приведено сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных петель циклического гистерезиса для цикла нагружения  $N=50$  при изотермических режимах нагружения (эксперименты И316МФ, И316МПФ, И760МФ, И760МПФ), а на рис. 2 – соответствующие петли пластического гистерезиса при неизотермическом нагружении (эксперименты МФТФ, МФТПФ, МПФТФ, МПФТПФ). Здесь и далее сплошными линиями отмечены результаты численного моделирования с использованием определяющих соотношений МПС [13–16], а штриховыми линиями – соответствующие экспериментальные данные (сравнение проводилось по всем опытным данным, приведенным в [12]).

При изотермическом циклическом нагружении (эксперименты И316МФ, И316МПФ, И760МФ, И760МПФ) наблюдается стабилизация петель циклического термопластического гистерезиса (см. рис. 1).

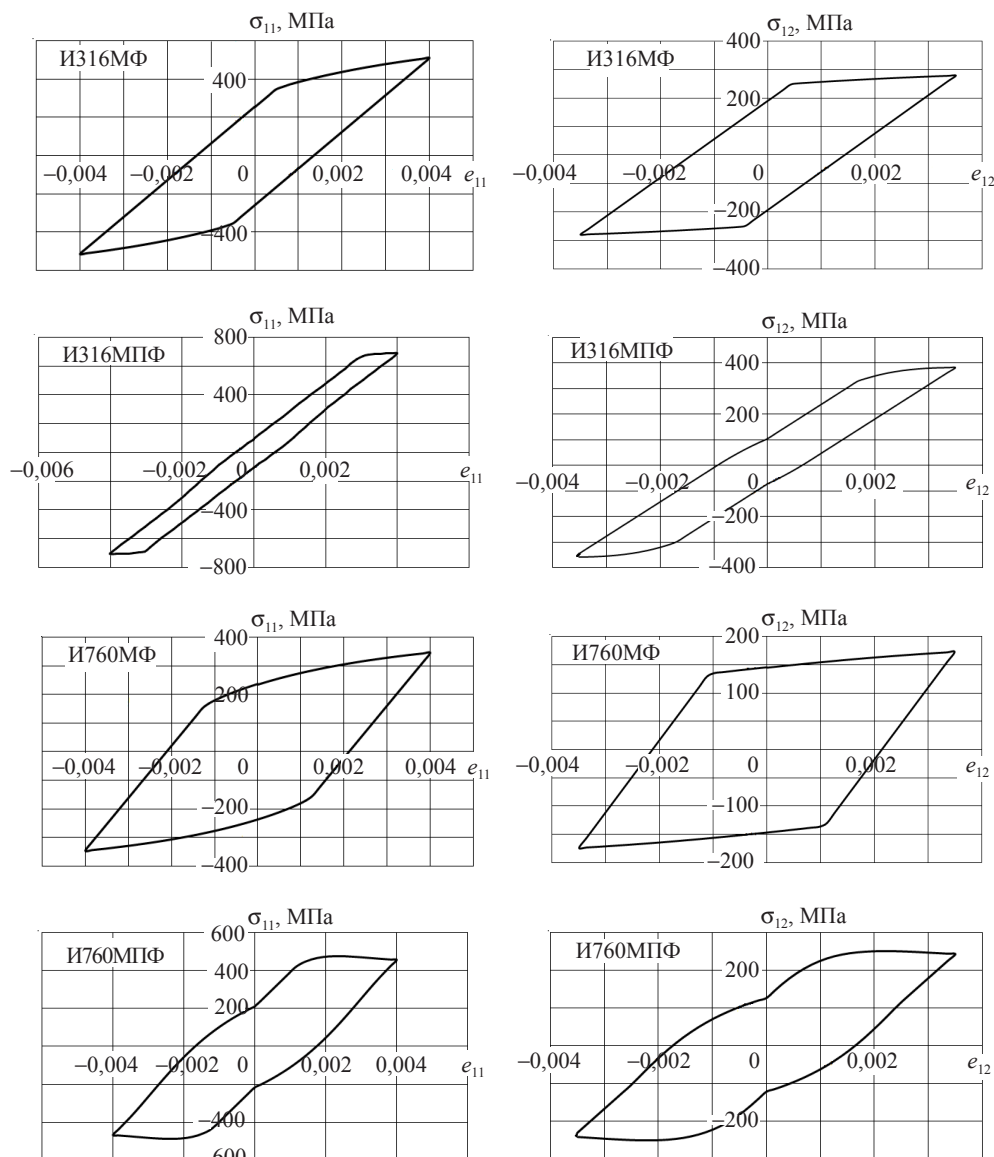


Рис. 1

При неизотермическом термоциклическом нагружении (эксперименты МФТФ, МФТПФ, МПФТФ, МПФТПФ) форма осевых  $\sigma_{11} - e_{11}$  и сдвиговых  $\sigma_{12} - e_{12}$  петель термопластического гистерезиса зависит от сдвига фаз  $\theta$  между амплитудами осевой деформации  $e_{11}$  и деформации сдвига  $e_{12}$ . Так, в эксперименте МФТФ в 50-м цикле наблюдается релаксация напряжений (как нормальных, так и касательных) вблизи максимальной температуры цикла (см. рис. 2).

Петли термопластического гистерезиса в эксперименте МФТПФ подобны петлям, наблюдаемым в опыте МФТФ, за исключением того, что релаксация напряжений произошла на «холодной» фазе цикла (при отрицательных значениях  $e_{11}$  и  $e_{12}$ ).

Петли упругопластического гистерезиса в эксперименте МПФТПФ качествен-

но отличаются от петель при синфазных механических испытаниях МФТФ и МФТПФ.

Петли гистерезиса в эксперименте МПФТФ подобны наблюдаемым петлям в опыте МПФТПФ за исключением того, что релаксация как осевых, так и сдвиговых напряжений произошла только вблизи максимальной температуры цикла (для положительных значений  $e_{11}$  и  $e_{12}$ ).

Таким образом, местоположение и степень релаксации как осевых, так и сдвиговых петель термопластического гистерезиса в значительной мере определяется углом сдвига фаз  $\psi$  между осевой деформацией  $e_{11}$  и температурой  $T$ .

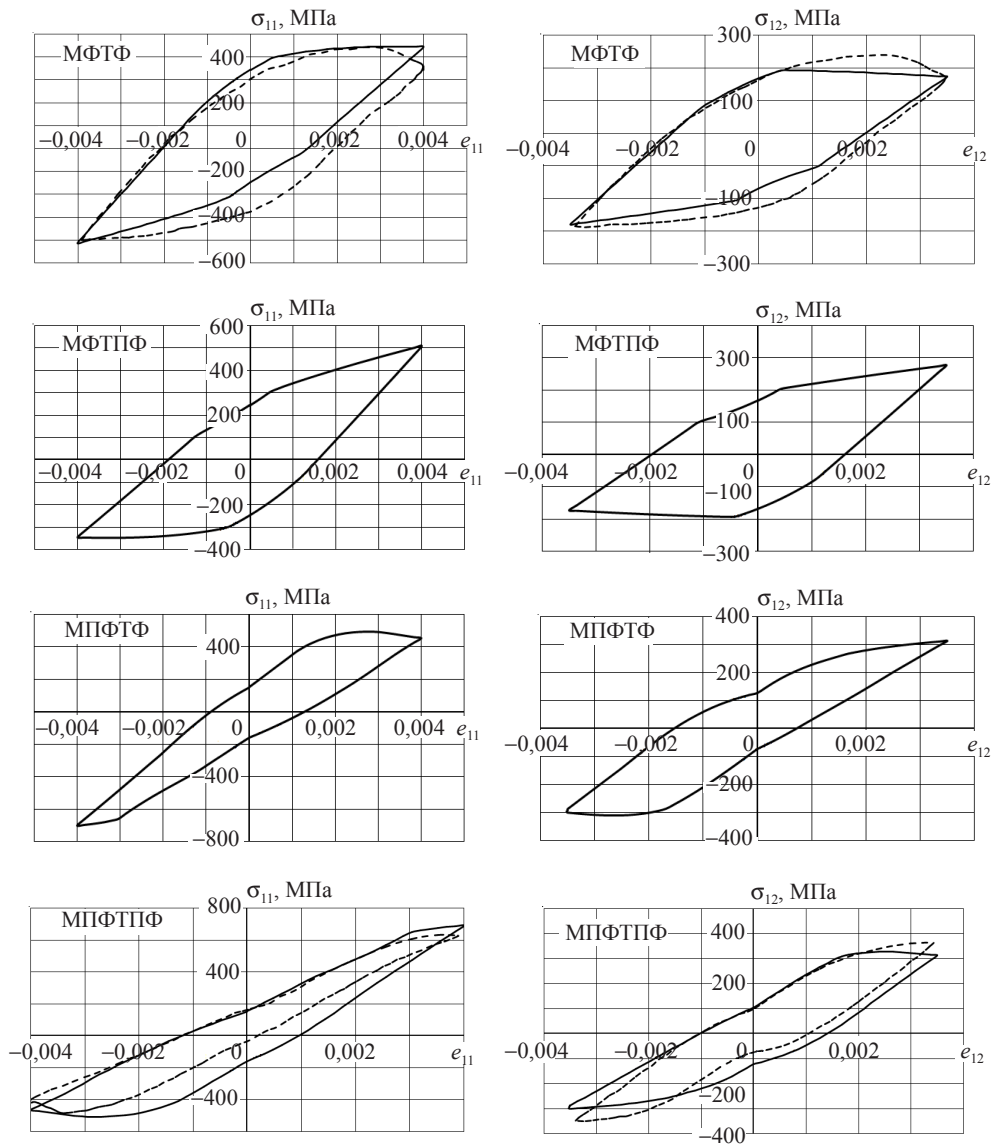


Рис. 2

На рис. 3, 4 для цикла  $N = 50$  приведены соответственно траектории нагружения (истории изменения компонент тензора напряжений) для изотермических (экс-



перименты И316МФ, И316МПФ, И760МФ, И760МПФ) и неизотермических (эксперименты МФТФ, МФТПФ, МПФТФ, МПФТПФ) режимов комбинированного термомеханического нагружения. Анализ графиков показывает наличие вращения главных площадок тензоров (непропорциональность изменения компонент тензоров напряжений и деформаций) и несоосность тензоров напряжений, полных и пластических деформаций.

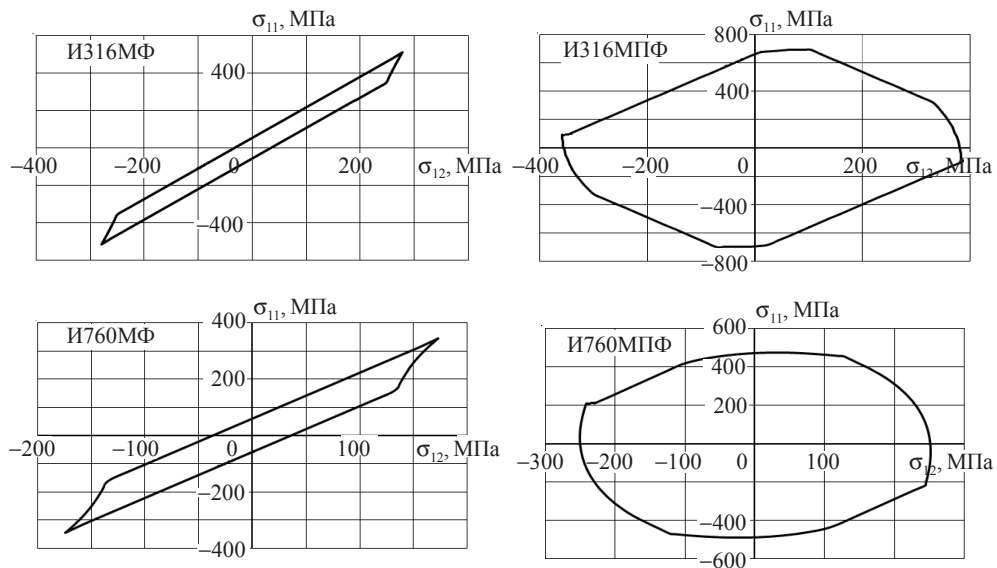


Рис. 3

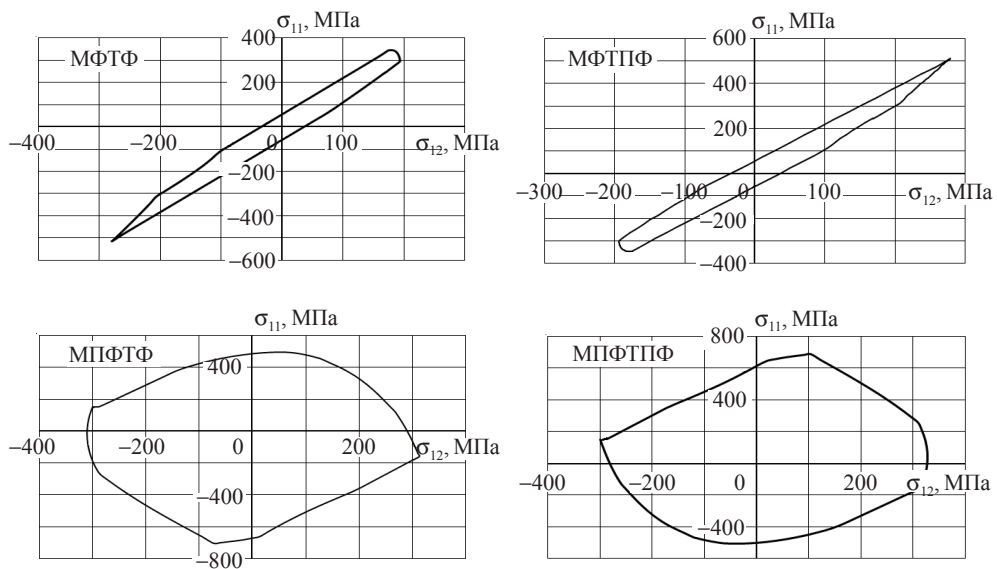


Рис. 4

На рис. 5, 6 представлены расчетные и экспериментальные зависимости амплитуд осевых  $\sigma_{11}$  и сдвиговых  $\sigma_{12}$  напряжений в зависимости от числа циклов нагружения. Сплошными линиями отмечены результаты численного моделирования,

а маркерами соответствующие экспериментальные данные (МПФТПФ – треугольники, МПФТФ – окружности, И316МПФ – ромбы, И760МПФ – квадраты). Видно, что степень циклического упрочнения при неізотермическом термоциклическом нагружении значительно больше, чем та, которая наблюдается в изотермических испытаниях при температурах 316 и 760 °С. Это расхождение означает, что механизм неізотермического термоциклического деформирования качественно отличается от изотермического.

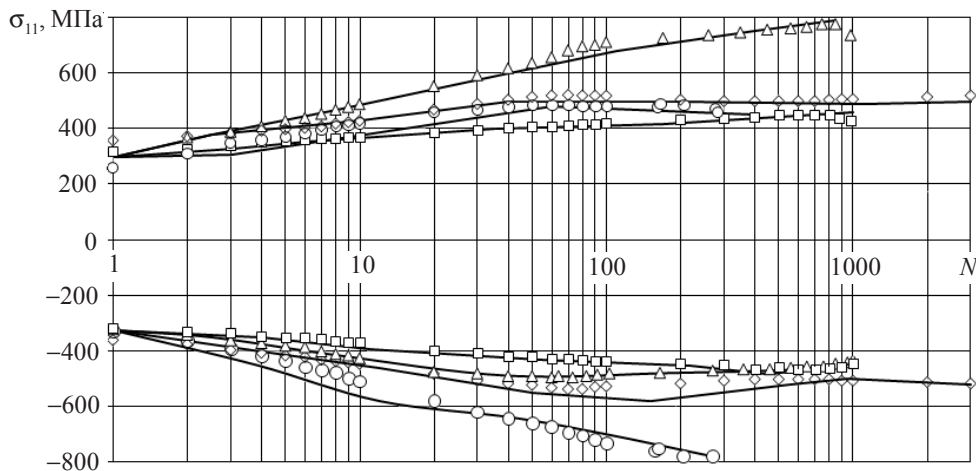


Рис. 5

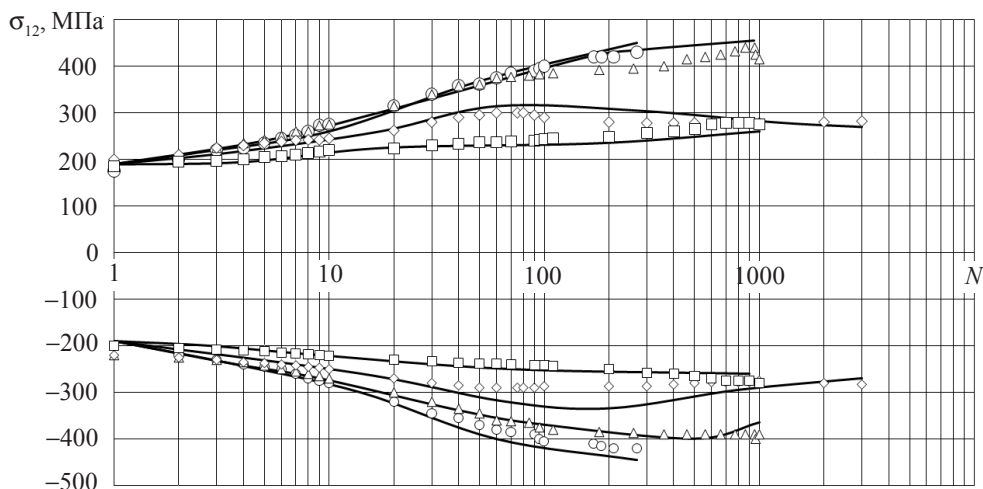


Рис. 6

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что использованная модель циклического термопластического деформирования достоверно описывает экспериментальные результаты и может в дальнейшем быть применена для расчета кинетики процесса накопления усталостных повреждений при циклических термо-механических воздействиях.

Для исследования влияния траектории деформирования на малоцикловую усталость жаропрочных сплавов были проведены расчеты процессов накопления усталостных повреждений при различных заданных законах изменения осевой де-

формации  $e_{11}$ , деформации сдвига  $e_{12}$  и температуры  $T$  (см. табл. 1). Расчетные результаты сравнивались с имеющимися опытными данными [11]. На рис. 7 показаны экспериментальные усталостные кривые жаропрочного сплава Haynes 188 при одноосном растяжении-сжатии для температур  $T = 425, 650$  и  $870^\circ\text{C}$  соответственно (штриховые линии).

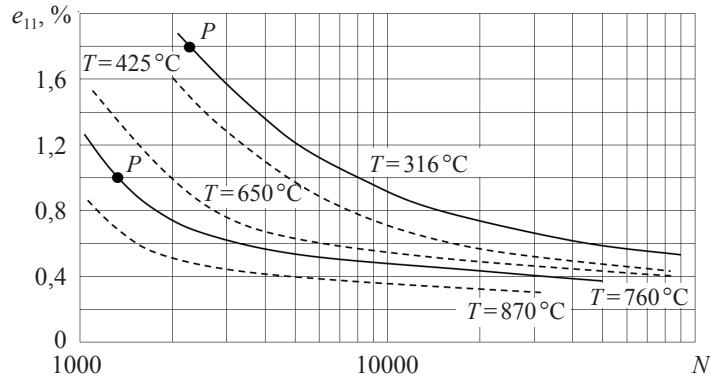


Рис. 7

Изотермические усталостные кривые при температурах  $T = 316$  и  $760^\circ\text{C}$  (сплошные линии) получены с использованием сплайн-аппроксимации (квадратичный сплайн) усталостных кривых при температурах  $T = 425, 650$  и  $870^\circ\text{C}$  [11]. Для определения материальных параметров эволюционного уравнения накопления повреждений использовалась точка  $P$  на усталостных кривых (см. рис. 7). Материальные параметры эволюционного уравнения накопления повреждений [8, 13–16] жаропрочного сплава Haynes 188 приведены в таблице 2.

Результаты расчетов, их сравнение с имеющимися опытными данными приведены на рис. 8, 9 и в таблице 5.

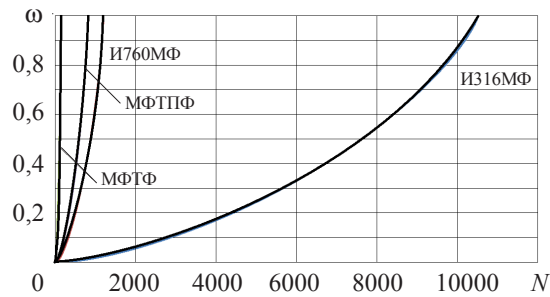


Рис. 8

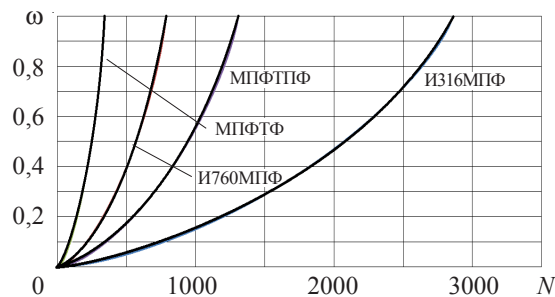


Рис. 9

На рис. 8, 9 показаны расчетные зависимости величин поврежденности  $\omega$  от числа циклов нагружения  $N$  для изотермических и неизотермических вариантов нагружения (см. таблицу 1).

Таблица 5

**Число циклов до разрушения для различных режимов термоциклического нагружения**

Режим нагружения		Число циклов нагружения, $N$	
		Эксперимент	Расчет
Изотермический	ИЗ16МФ	9448	10512
	ИЗ16МПФ	3410	2860
	И760МФ	910	1205
	И760МПФ	1089	785
Неизотермический	МФТФ	282	143
	МФТПФ	569	830
	МПФТФ	270	341
	МПФТПФ	1004	1307

Сравнение результатов расчета экспериментальных данных показывает, что:

- развитая в работах [13–16] модель поврежденной среды с достаточной для инженерных расчетов точностью описывает процессы циклического изотермического и неизотермического деформирования и накопления усталостных повреждений при комбинированном термомеханическом нагружении и позволяет рассчитывать малоцикловую усталостную долговечность жаропрочных сплавов при произвольных траекториях деформирования (при сравнении опытных и расчетных данных следует иметь в виду, что информация в [16] представлена без учета разброса экспериментальных данных в пределах каждого отдельного опыта);

- при изотермическом циклическом термопластическом деформировании ( $T = 316^\circ\text{C}$ ) механическое непропорциональное деформирование (тест ИЗ16МПФ) приводит к снижению усталостной долговечности по сравнению с пропорциональным деформированием (тест ИЗ16МФ) практически в три раза; с ростом температуры ( $T = 760^\circ\text{C}$ ) эта зависимость не работает;

- неизотермическое циклическое термопластическое деформирование приводит к снижению усталостной долговечности по сравнению с изотермическим деформированием;

- наименьшая долговечность наблюдается, когда максимальное значение температурного цикла достигается в полупериоде растяжения по механическим деформациям  $e_{11}$  и  $e_{12}$ , а минимальное значение температурного цикла – в полупериоде сжатия (тест МФТФ), что соответствует экспериментальным данным [7]. Наибольшая долговечность (тест МПФТПФ) наблюдается, когда механические деформации и температура меняются в противофазе ( $\theta = 90^\circ$  и  $\psi = 180^\circ$ ).

### Заключение

Проведена оценка достоверности модели поврежденной среды [13–16] путем сопоставления результатов численных расчетов с известными из литературы опыт-

ными данными по малоцикловой усталостной долговечности при изотермических и неизотермических режимах комбинированного термомеханического деформирования, которые подтверждают правильность моделирования процессов сложного циклического термомеханического деформирования и усталостной долговечности жаропрочных сплавов.

#### Список литературы

1. Hulford G.R. Low cycle thermal fatigue. Mechanics and Mathematical Methods. *Thermal stress II*. Ch. 6. Elsevier Science Publishers B.V., 1987. P. 329–428.
2. Исследование малоцикловой прочности при высоких температурах. Под ред. С.В. Серенсена. М.: Наука, 1975. 236 с.
3. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. М.: Мир, 1984. 624 с.
4. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *Int. J. Plasticity*. 1989. V. 5, No 3. P. 247–302.
5. Корум, Сартори. Оценка современной методологии проектирования высокотемпературных элементов конструкций на основе экспериментов по их разрушению. *Теоретические основы инженерных расчетов*. 1988. №1. С. 104–118.
6. Bernard-Connolly M., Biron A., Bue-Quic T. Low-cycle fatigue behaviour and cumulative damage effect of SA-516-70 steel at room and high temperature. *Journal Random Fatigue Life Predictions ASME Publ.* 1980. P. 297–302.
7. Гусенков А.П., Казанцев А.Г. Прочность при малоцикловом и длительном циклическом нагружении и нагреве. *Машиноведение*. 1979. №3. С. 59–65.
8. 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.
9. Сентоглу. Влияние ограничений на термомеханическую усталость. *Теоретические основы инженерных расчетов*. 1985. №3. С. 74–83.
10. Liang Jin, Pellox R.M., Xie Xishan. Thermomechanical fatigue behavior of a nickel base superalloy. *Chin. J. Met. Sci. Technol.* 1989. V. 5. P. 1–7.
11. HAYNES® 188 ALLOY. STANDART PRODUCTS by Brand or Alloy Designation H-3001B / Global Headquarters 1020 West Park Avenue, P.O. Box 9013. Kokomo, Indiana 46904-9013 (USA).
12. Kalluri S., Bonacuse P.J. An axial-torsional thermomechanical fatigue testing technique. *Preparade for the Symposium on multiaxial fatigue and deformation testing techniques*. Denver, Colorado. May 15, 1995. 25 p.
13. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
14. 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.
15. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Тарасов И.С. Численное моделирование накопления повреждений при сложном пластическом деформировании. *Вычислительная механика сплошных сред*. 2009. Т. 2, №1. С. 5–18.
16. Волков И.А., Шишулин Д.Н., 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.
17. Боднер С.Р., Линдхолм У.С. Критерий приращения повреждения для зависящего от времени разрушения материалов. *Труды Амер. об-ва инж.-мех. Сер. Д. Теоретические основы инженерных расчетов*. 1976. Т. 100, №2. С. 51–58.
18. Леметр Ж. Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластичных материалов. *Труды Амер. об-ва инж.-мех. Сер. Д. Теоретические*

основы инженерных расчетов. 1985. Т. 107, №1. С. 90–98.

19. Murakami S., Imaizumi T. Mechanical description of creep damage and its experimental verification. *J. Méc. Théor. Appl.* 1982. V. 1. P. 743–761.

#### References

1. Hulford G.R. Low cycle thermal fatigue. Mechanics and Mathematical Methods. *Thermal stress II*. Ch. 6. Elsevier Science Publishers B.V., 1987. P. 329–428.

2. *Issledovanie malotsiklovoy prochnosti pri vysokikh temperaturakh*. Pod red. S.V. Serensena. M.: Nauka, 1975. 236 s.

3. Kollinz Dzh. *Povrezhdenie materialov v konstruktivnykh. Analiz, predskazanie, predotvrashchenie*. M.: Mir, 1984. 624 s.

4. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *Int. J. Plasticity*. 1989. V. 5, No 3. P. 247–302.

5. Korum, Sartori. Otsenka sovremennoy metodologii proektirovaniya vysokotemperaturnykh elementov konstruktivnykh na osnove eksperimentov po ikh razrusheniyu. *Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov*. 1988. №1. S. 104–118.

6. Bernard-Connolly M., Biron A., Bue-Quic T. Low-cycle fatigue behaviour and cumulative damage effect of SA-516-70 steel at room and high temperature. *Journal Random Fatigue Life Predictions ASME Publ.* 1980. P. 297–302.

7. Gusenkov A.P., Kazantsev A.G. Prochnost' pri malotsiklovom i dlitel'nom tsiklicheskom nagruzhenii i nagreve. *Mashinovedenie*. 1979. №3. S. 59–65.

8. 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. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2015. T. 77, №4. S. 329–343.

9. Sentoglu. Vliyanie ogranicheniy na termomekhanicheskuyu ustalost'. *Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov*. 1985. №3. S. 74–83.

10. Liang Jin, Pellox R.M., Xie Xishan. Thermomechanical fatigue behavior of a nickel base superalloy. *Chin. J. Met. Sci. Technol.* 1989. V. 5. P. 1–7.

11. HAYNES® 188 ALLOY. STANDART PRODUCTS by Brand or Alloy Designation H-3001B / Global Headquarters 1020 West Park Avenue, P.O. Box 9013. Kokomo, Indiana 46904-9013 (USA).

12. Kalluri S., Bonacuse P.J. An axial-torsional termomechanical fatigue testing technique. *Preparade for the Symposium on multiaxial fatigue and deformation testing techniques*. Denver, Colorado. May 15, 1995. 25 p.

13. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. *Uravneniya sostoyaniya vyzakouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami*. M.: Fizmatlit, 2008. 424 s.

14. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G., Tarasov I.S. Modelirovanie slozhnogo plasticheskogo deformirovaniya i razrusheniya metallov pri mnogoosnom neproportsional'nom nagruzhenii. *PMTF*. 2009. T. 50, №5. S. 193–205.

15. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G., Tarasov I.S. Chislennoe modelirovanie nakopleniya povrezhdeniy pri slozhnom plasticheskom deformirovanii. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*. 2009. T. 2, №1. S. 5–18.

16. Volkov I.A., Shishulin D.N., Kazakov D.A., Pichkov S.N. Modelirovanie osnovnykh zakonov protsessa deformirovaniya i nakopleniya povrezhdeniy v konstruktivnykh materialakh na baze kontseptsii mekhaniki povrezhdennoy sredy. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2012. Vyp. 74. S. 16–27.

17. Bodner S.R., Lindholm U.S. Kriteriy prirashcheniya povrezhdeniya dlya zavisyashchego ot vremeni razrusheniya materialov. *Trudy Amer. ob-va inzh.-mekh. Ser. D. Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov*. 1976. T. 100, №2. S. 51–58.

18. Lemetr Zh. Kontinual'naya model' povrezhdeniya, ispol'zuemaya dlya rascheta razrusheniya plastichnykh materialov. *Trudy Amer. ob-va inzh.-mekh. Ser. D. Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov*. 1985. T. 107, №1. S. 90–98.

19. Murakami S., Imaizumi T. Mechanical description of creep damage and its experimental verification. *J. Méc. Théor. Appl.* 1982. V. 1. P. 743–761.

**MODELING COMPLEX PLASTIC DEFORMATION AND FATIGUE DAMAGE  
ACCUMULATION IN HEAT-RESISTANT ALLOYS  
UNDER COMBINED THERMAL-MECHANICAL LOADING**

**Korotkikh Yu.G.**<sup>1,2</sup>, Volkov I.A.<sup>1</sup>, Igumnov L.A.<sup>2</sup>, Shishulin D.N.<sup>3</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>*Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev,  
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

The main physical laws of complex thermal-plastic deformation and fatigue damage accumulation in structural materials (metals and their alloys) under various modes of combined thermal-mechanical loading are considered, as well as mathematical models of such processes. Results of numerically modeling cyclic thermal-plastic deformation and fatigue damage accumulation in heat-resistant alloys (Haynes 188) under combined thermal-mechanical loading are presented. Special attention is paid to the issues of modeling processes of cyclic thermal-plastic deformation and fatigue damage accumulation for complex deformation processes accompanied by rotation of the main sites of stress and strain tensors. The presented model of damaged medium is shown to describe, accurately enough for engineering computations, the processes of cyclic isothermal and non-isothermal deformation and fatigue damage accumulation under combined thermal-mechanical loading and makes it possible to analyze low-cycle fatigue life of heat-resistant alloys for arbitrary strain paths.

*Keywords:* modeling, thermocyclic strength, difficult deformation, mechanical damaged the environment, fatigue life, strength, destruction, resource.