

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2015 г. **Коротких Ю.Г.^{1,3}, Волков И.А.¹, Игумнов Л.А.³,
Шишулин Д.Н.², Тарасов И.С.¹**

¹*Волжский государственный университет водного транспорта,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

²*Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация*

³*Научно-исследовательский институт механики
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

pmptmvgavt@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.09.2015

Рассмотрены основные закономерности процессов деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах (металлах и сплавах) при различных режимах комбинированного термомеханического нагружения и математические модели указанных процессов. Особое внимание уделено вопросам моделирования процессов циклического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений для сложных процессов деформирования, сопровождающихся вращением главных площадок тензоров напряжений и деформаций. Приведены результаты численного моделирования процессов циклического упругопластического деформирования и накопления повреждений в жаропрочных сплавах при синфазных и противофазных термомеханических воздействиях. Исследовано влияние изменения механической деформации и температуры на усталостную долговечность жаропрочных сталей при непропорциональных режимах термомеханического нагружения. Сопоставление результатов проведенных расчетов с экспериментальными данными и численными результатами по изотермическому и неизотермическому (синфазному и противофазному) циклическому деформированию лабораторных образцов, полученными другими авторами, показало, что представленная в статье модель циклического термопластического деформирования конструкционного материала достоверно описывает экспериментальные результаты и может эффективно применяться для расчета кинетики процесса накопления усталостных повреждений при циклических синфазных и противофазных термомеханических воздействиях.

Ключевые слова: моделирование, термоциклическая прочность, сложное деформирование, синфазное и противофазное нагружение, механика поврежденной среды, долговечность, разрушение.

Введение

Эффекты деформирования при термомеханическом нагружении определяются зависимостью физико-механических характеристик конструкционных материалов от температуры, наличием ограничений температурных деформаций и соотношениями 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 часто 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. Это характерно и для упругой области цикла растяжения-сжатия вследствие зависимости модуля упругости от температуры (нелинейная убывающая функция растущей температуры), и процесс деформирования 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 приводит, как правило, к многоосному процессу деформирования, сопровождающемуся при сочетании с механическим деформированием вращением главных площадок тензоров напряжений и деформаций за счет непропорциональности процесса деформирования. Это приводит к новым источникам дисбаланса: напряженно-деформированное состояние (НДС) в любой точке цикла отлично от состояний в других точках. Сдвиг фаз между изменениями температуры и механической деформации является одним из важнейших факторов, связанных и с температурной усталостью.

По исследованию закономерностей усталости при повышенных температурах в изотермических условиях выполнен достаточно большой объем работ [1–9], в то время как термоусталость изучена недостаточно. Основная проблема заключается в том, что физико-механические характеристики конструкционного материала существенно зависят от температуры, а экспериментальные исследования усталости в основном проводятся в изотермических условиях при ожидаемой максимальной температуре цикла.

Двумя простейшими и наиболее распространенными техническими предпосылками для переноса изотермического поведения на неизотермические циклические условия являются следующие предположения:

- сопротивление изотермической усталости при максимальной температуре цикла является эквивалентным сопротивлению температурной неизотермической циклической усталости;

- минимальное сопротивление изотермической усталости в диапазоне температур температурного циклирования эквивалентно неизотермической усталости.

В качестве других предпосылок иногда используют алгебраическую среднюю или интегральную эквивалентную температуру между двумя крайними значениями. Ни одно из этих допущений не имеет глубокого физического и экспериментального обоснования. Сопоставление экспериментальных результатов термомехани-

ческой и изотермической усталости часто дает неожиданные расхождения: реальная долговечность при термомеханической усталости может быть значительно ниже, чем предполагаемая на основании изотермических испытаний [1].

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;

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

Многоосность НДС также является источником дисбалансов в термомеханических нагружениях. При одновременных механическом и температурном воздействиях происходит значительное вращение главных площадок тензоров напряжений и деформаций (непропорциональное сложное нагружение), которое при наличии пластического деформирования приводит к несоосности тензоров напряжений, полных и пластических деформаций. Для описания этих процессов необходимо использовать соответствующие модели циклической термопластичности, учитывающие вращение главных площадок.

Термомеханическое усталостное циклирование может инициировать механизмы повреждения, которые не развиваются при изотермической усталости. Например, защитные покрытия могут растрескиваться при низких температурах цикла, когда низкая температура совпадает с пиком растягивающих деформаций. При высокотемпературной усталости усиливаются эффекты воздействия внешней среды. Основными параметрами, определяющими темпы 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.

Важным выводом из сравнительного анализа экспериментальных результатов по термомеханической усталости и изотермическим усталостным испытаниям является то, что оценка долговечности по результатам изотермических испытаний при максимальной температуре цикла не является консервативной.

Снижение усталостной долговечности при термомеханическом нагружении происходит в результате действия дополнительных механизмов деградации, которые отсутствуют при изотермических нагружениях (изменения зеренной структуры материала, дополнительное деформационное старение, усиление влияния окружающей среды). Изучение влияния сдвига фаз между изменениями температуры и механической деформации [7] показывает, что наименьшая долговечность наблюдается, как правило, когда максимальная температура температурного цикла достигается в полцикле растяжения по механической деформации, а минимальная – в полцикле сжатия, хотя отдельные материалы (например, сталь 15Х2МФА при $T \leq 350$ °С) демонстрируют нечувствительность к сдвигу фаз между изменениями температуры и механической деформации.

Таким образом, несмотря на большое внешнее сходство явлений изотермичес-

кой и неизотермической усталости, использовать результаты изотермической малоциклового усталости для оценки неизотермической усталостной долговечности следует с большой осторожностью.

При разработке моделей поведения материалов с широкой областью применимости для обширного спектра внешних нагрузок и температур неизбежно приходится искать компромисс между соответствием модели действительному поведению материала и эффективностью применения модели при решении прикладных задач, возможностью определения материальных параметров модели из достаточно просто реализуемых базовых экспериментов и точностью определения этих параметров. Широкая область применимости модели в ряде случаев может явиться причиной снижения точности расчетов, а невозможность точного определения входящих в модель материальных параметров и сложность ее реализации при решении прикладных задач может привести к нулевой практической ценности модели. Таким образом, подлинная ценность модели определяется тем, насколько хорошо она удовлетворяет следующим требованиям: широта охвата существующих явлений и точность, соответствие действительности и удобство применения [10].

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), и в последние годы для решения таких задач успешно развивается новая дисциплина – механика поврежденной среды (МПС) [10].

В работах [10–13] с современных позиций МПС развита математическая модель, описывающая процессы циклического вязкопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в конструкционных материалах (металлах и сплавах) при многоосных непропорциональных путях комбинированного термо-механического нагружения.

Ниже в целях качественной и количественной оценки развитой модели проведено исследование влияния законов изменения механической деформации и температуры на усталостную долговечность жаропрочных сталей при непропорциональных режимах термомеханического нагружения. Результаты расчета по модели [10–13] сопоставлены с экспериментальными данными и численными результатами, полученными другими авторами [8, 14], по изотермическому и неизотермическому (синфазному и противофазному) циклическому деформированию лабораторных образцов.

1. Определяющие соотношения механики поврежденной среды

Модель поврежденной среды [10–13] состоит из трех взаимосвязанных частей:
– соотношений, определяющих циклическое термопластическое поведение материала с учетом зависимости от процесса разрушения;
– уравнений, описывающих кинетику накопления усталостных повреждений;
– критерия прочности поврежденного материала.

а) Соотношения циклической термопластичности

В упругой области связь между шаровыми и девиаторными составляющими тензоров напряжений и деформаций устанавливается с помощью закона Гука:

$$\sigma = 3K[e - \alpha(T - T_0)], \quad \sigma'_{ij} = 2Ge'_{ij}, \quad e'_{ij} = e'_{ij} - e'_{ij}^p,$$

$$\dot{\sigma} = 3K[\dot{e} - (\dot{\alpha}T + \alpha\dot{T})] + \frac{\dot{K}\sigma}{K}, \quad \dot{\sigma}'_{ij} = 2G\dot{e}'_{ij} + \frac{\dot{G}\sigma'_{ij}}{G}, \quad (1)$$

где $\sigma, \dot{\sigma}, e, \dot{e}$ – шаровые, а $\sigma'_{ij}, \dot{\sigma}'_{ij}, e'_{ij}, \dot{e}'_{ij}$ – девиаторные составляющие тензоров напряжений σ_{ij} , деформаций e_{ij} и их скоростей $\dot{\sigma}_{ij}, \dot{e}_{ij}$ соответственно; T – температура; T_0 – начальная температура; $K(T)$ – модуль объемного сжатия; $G(T)$ – модуль сдвига; $\alpha(T)$ – коэффициент линейного температурного расширения материала.

Эффекты монотонного и циклического деформирования в пространстве напряжений учитываются с помощью поверхности текучести, уравнение которой имеет вид:

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

Для описания сложных циклических режимов деформирования в пространстве напряжений вводится поверхность циклической «памяти». Уравнение поверхности «памяти», позволяющее при расчетах отделить монотонные процессы деформирования от циклических, имеет вид:

$$F_p = \rho_{ij}^p \rho_{ij}^p - \rho_{\max}^2 = 0, \quad (3)$$

где ρ_{\max} – максимальный за историю нагружения модуль переменной ρ_{ij}^p .

Примем эволюционное уравнение для радиуса поверхности текучести в виде [10]:

$$\dot{C}_p = [q_\chi H(F_p) + a(Q_s - C_p)\Gamma(F_p)]\dot{\chi} + q_3\dot{T}, \quad (4)$$

$$C_p = C_p^0 + \int_0^t \dot{C}_p dt, \quad \dot{\chi} = \left(\frac{2}{3} \dot{e}'_{ij} \dot{e}'_{ij} \right)^{1/2}, \quad \chi_m = \int_0^t \dot{\chi} H(F_p) dt, \quad \chi = \int_0^t \dot{\chi} dt, \quad (5)$$

$$q_\chi = \frac{q_2 A \psi_1 + (1-A)q_1}{A\psi_1 + (1-A)}, \quad Q_s = \frac{Q_2 A \psi_2 + (1-A)Q_1}{A\psi_2 + (1-A)}, \quad 0 \leq \psi_i \leq 1 \quad (i=1, 2), \quad (6)$$

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

$$H(F_p) = \begin{cases} 1, & F_p = 0 \wedge \rho_{ij}^p \dot{\rho}_{ij}^p > 0 \\ 0, & F_p < 0 \vee \rho_{ij}^p \dot{\rho}_{ij}^p \leq 0 \end{cases}, \quad \Gamma(F_p) = 1 - H(F_p). \quad (8)$$

Здесь q_1, q_2, q_3 – модули изотропного упрочнения: q_1 соответствует монотонным лучевым путям нагружения, q_2 – излому траектории деформирования на 90° , q_3 – температурному изменению радиуса поверхности текучести; a – постоянная, определяющая скорость процесса стабилизации формы петли гистерезиса циклического деформирования материала; Q_s – стационарное значение радиуса поверхности текучести при данных ρ_{\max} и T ; Q_1 и Q_2 – параметры циклического изотропного упрочнения при пропорциональном нагружении и изломе траектории на 90° соответственно; χ и χ_m – длины траекторий пластического деформирования материала при циклическом и монотонном нагружениях; C_p^0 – начальное значение радиуса поверхности текучести.

Уравнение для смещения поверхности текучести основано на гипотезе А.А. Ильюшина, заключающейся в том, что упрочнение зависит от истории деформирования лишь на некоторой ближайшей части траектории (запаздывание векторных свойств).

Внутренняя переменная ρ_{ij}^p , учитывающая анизотропию упрочнения пластического деформирования, удовлетворяет эволюционному уравнению [4, 10]:

$$\dot{\rho}_{ij}^p = g_1^p \dot{\epsilon}_{ij}^p - g_2^p \rho_{ij}^p \dot{\chi} - g_3^p \rho_{ij}^p \dot{T}, \quad \rho_{ij}^p = \int_0^t \dot{\rho}_{ij}^p dt, \quad (9)$$

где $g_1^p > 0$, $g_2^p > 0$ и $g_3^p > 0$ – модули анизотропного упрочнения. Первый и второй члены правой части этого уравнения отвечают за анизотропную часть деформационного упрочнения, а третий – за изменение ρ_{ij} в результате воздействия температуры T .

Для характеристики поведения поверхности «памяти» формулируется эволюционное уравнение для ρ_{\max} :

$$\dot{\rho}_{\max} = \frac{(\rho_{ij}^p \dot{\rho}_{ij}^p) H(F_p)}{(\rho_{mn}^p \rho_{mn}^p)^{1/2}} - g_2 \rho_{\max} \dot{\chi} - g_3 \rho_{\max} \dot{T}. \quad (10)$$

б) Эволюционные уравнения накопления повреждений

Эволюционное уравнение накопления усталостных повреждений в элементарном объеме материалов имеет вид [4, 10, 15–17]:

$$\dot{\omega}_p = \frac{\alpha_p + 1}{r_p + 1} f_p(\beta) Z_p^{\alpha_p} (1 - \omega_p)^{-r_p} \langle \dot{Z}_p \rangle, \quad (11)$$

где α_p и r_p – материальные параметры [10],

$$Z_p = \frac{W_p - W_a}{W_p^f - W_a}, \quad (12)$$

$$\langle \dot{Z}_p \rangle = \frac{\langle \dot{W}_p \rangle}{W_p^f - W_a}, \quad \dot{W}_p = \rho_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p, \quad (13)$$

$$f_p(\beta) = \exp(k_p \beta), \quad (14)$$

W_p – энергия, идущая на образование микродефектов; W_a – значение энергии W_p в конце первой стадии процесса накопления повреждений; W_p^f – значение энергии W_p , соответствующей образованию макроскопических трещин.

Здесь и далее для любой величины \dot{B} , заключенной в угловые скобки $\langle \rangle$, выполняются условия

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

в) Критерий прочности поврежденного материала

В качестве критерия окончания фазы развития рассеянных микроповреждений (стадии образования макротрещины) принимается условие достижения величиной поврежденности своего критического значения:

$$\omega_p = \omega_p^f \leq 1. \quad (15)$$

Интегрируя эволюционное уравнение накопления повреждений (11)–(14) совместно с определяющими соотношениями термовязкопластичности (1)–(10) и кри-

терием разрушения (15) по известной истории термомеханического нагружения в данном элементарном объеме материала, можно определить момент образования макроскопической трещины.

2. Численные результаты

В работе [9] представлены экспериментальные результаты по термоциклическому деформированию жаропрочного никелевого сплава Nimonic 80A с добавлением ниобия. Все испытания образцов, как изотермические, так и неизотермические, проводились с частотой 0,0025 Гц (400 с на цикл) в интервале температур T от 571 до 823 °С. Изотермические (рис. 1а) и неизотермические (рис. 1б, 1в) испытания проводились при жестком нагружении, амплитуда деформации e_{11} в экспериментах с постоянной температурой T составляла 1%. При переменных температурах приведены результаты эксперимента с амплитудами от 0,45 до 1%. Температура в неизотермических испытаниях изменялась как синфазно (рис. 1б), так и противофазно (рис. 1в) по отношению к изменению деформаций.

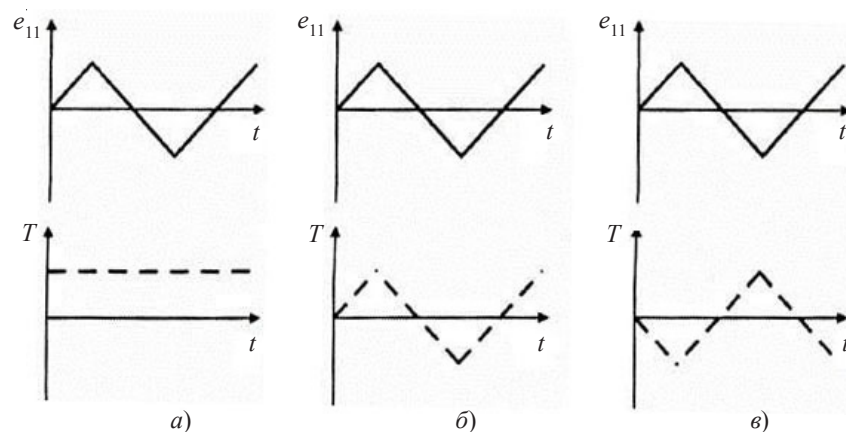


Рис. 1

Физико-механические характеристики жаропрочного никелевого сплава Nimonic 80A и материальные параметры модели поврежденной среды [10–13] в зависимости от температуры приведены в таблицах 1–3.

Таблица 1

Физико-механические характеристики и параметры модели

Характеристики	Температура T , °С		
	571	700	823
K , МПа	150500	139666	106000
G , МПа	70450	64461	48333
α , 1/град	$1,48 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$1,64 \cdot 10^{-5}$
C_p^0 , МПа	384	363	340
g_1 , МПа	70850	56300	15500
g_2	308	290	271
a	65	58	45
W_p^f , МДж/м ³	41,5	39	35,5

Таблица 2

Модуль монотонного изотропного упрочнения q_1 , МПа									
χ_m	0	0,0005	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,0075	0,01
$T = 571 \text{ }^\circ\text{C}$									
q_1	-1981	-5362	-8255	-11002	-8321	-7006	-8243	-14420	-20600
$T = 700 \text{ }^\circ\text{C}$									
q_1	2666	-3667	-4202	-3847	-3049	-8346	-8112	3072	14260
$T = 823 \text{ }^\circ\text{C}$									
q_1	-4974	-4405	-3692	-2124	-3716	-3463	-2890	-1722	-553

Таблица 3

Модуль циклического упрочнения $Q_1(\rho_{\max})$, МПа

$T = 571 \text{ }^\circ\text{C}$				
ρ_{\max} , МПа	266,6	232,7	160,9	88,5
Q_1	384	395	420	450
$T = 700 \text{ }^\circ\text{C}$				
ρ_{\max} , МПа	160,5	140,9	106,6	63,2
Q_1	303	309	281	278
$T = 823 \text{ }^\circ\text{C}$				
ρ_{\max} , МПа	68,7	65,8	57,86	45,9
Q_1	230	219	125	120

На рис. 2а приведено сравнение результатов численного исследования и экспериментальных данных для стабилизированной петли циклического деформирования при температуре 700 °С (тип нагружения показан на рис. 1а), амплитуда деформаций составляет 1%. Здесь и далее маркерами отмечены результаты эксперимента, а на рис. 2а, б, в штриховыми черными линиями представлены результаты численного моделирования по модели [14], красными линиями – численные результаты, полученные по модели МПС, предложенной авторами [10–13].

На рис. 2б приведено сравнение стабилизированных петель циклического неизотермического деформирования при синфазном нагружении (см. рис. 1б): амплитуда деформаций составляет 0,6%, максимальная температура в цикле составляла 823 °С (достигалась при растяжении), минимальная температура в цикле составляла 571 °С (достигалась при сжатии).

На рис. 2в приведено сравнение результатов моделирования неизотермического циклического нагружения при противофазном нагружении (см. рис. 1в) (амплитуда деформаций, максимальные и минимальные значения температур такие же, как и в предыдущем случае). В качестве стабилизированных петель циклического деформирования во всех трех случаях приведены 67-й и 68-й полуциклы нагружения.

На рис. 2г приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных крайних точек стабилизированных кривых неизотермического циклического деформирования при различных программах нагружения. Маркерами показаны экспериментальные данные стабилизированных циклов при синфазном нагружении (см. рис. 1б) при тех же амплитудах деформаций. Сплошными линиями показаны расчетные зависимости крайних точек стабилизированных циклов деформирования от амплитуд деформирования при синфазном нагружении, а пунктирными линиями – при противофазном нагружении.

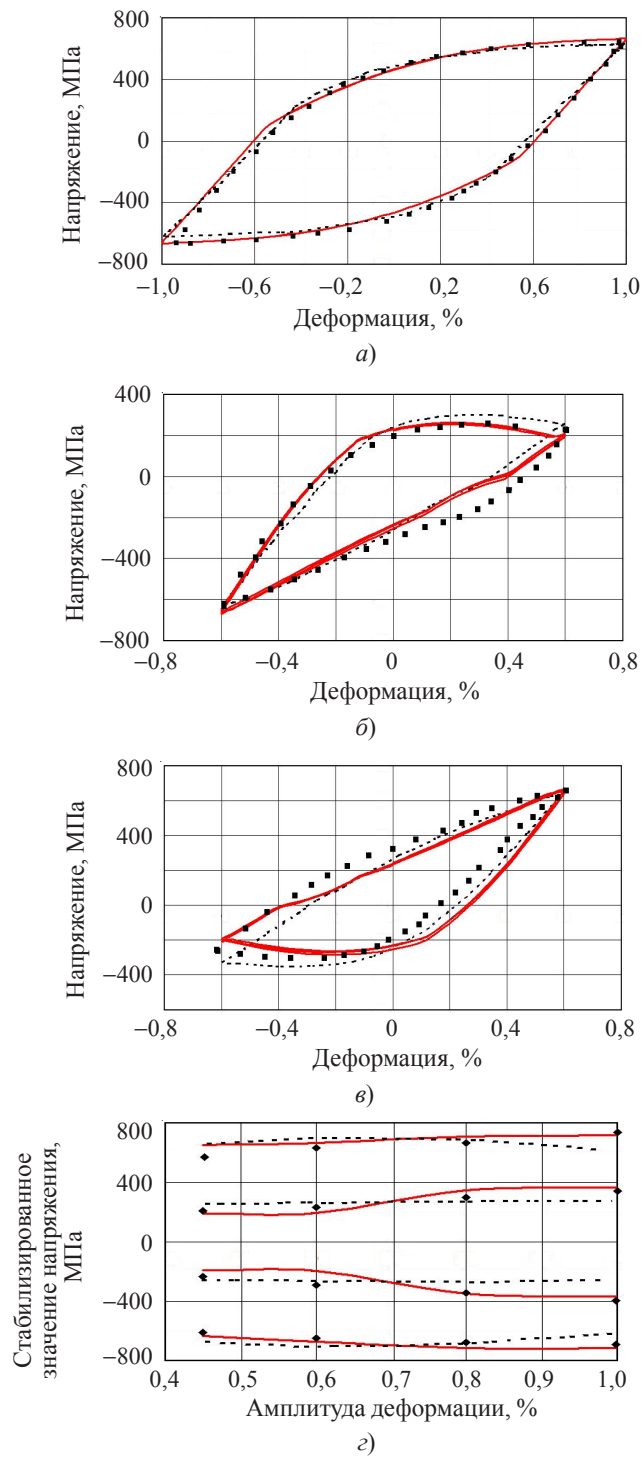


Рис. 2

Проведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментом в интервале температур от 571 до 823 °С при амплитудах нагружения 0,45 и 1%. Зависимости амплитуд напряжения от числа циклов представлены на рис. 3. Рисунок 3а соответствует синфазному нагружению с амплитудой деформаций 0,45%, а рис. 3б – с амплитудой деформаций 1%; рис. 3в соответствует противофазному нагружению с амплитудой 0,45%, а рис. 3г – с амплитудой 1%.

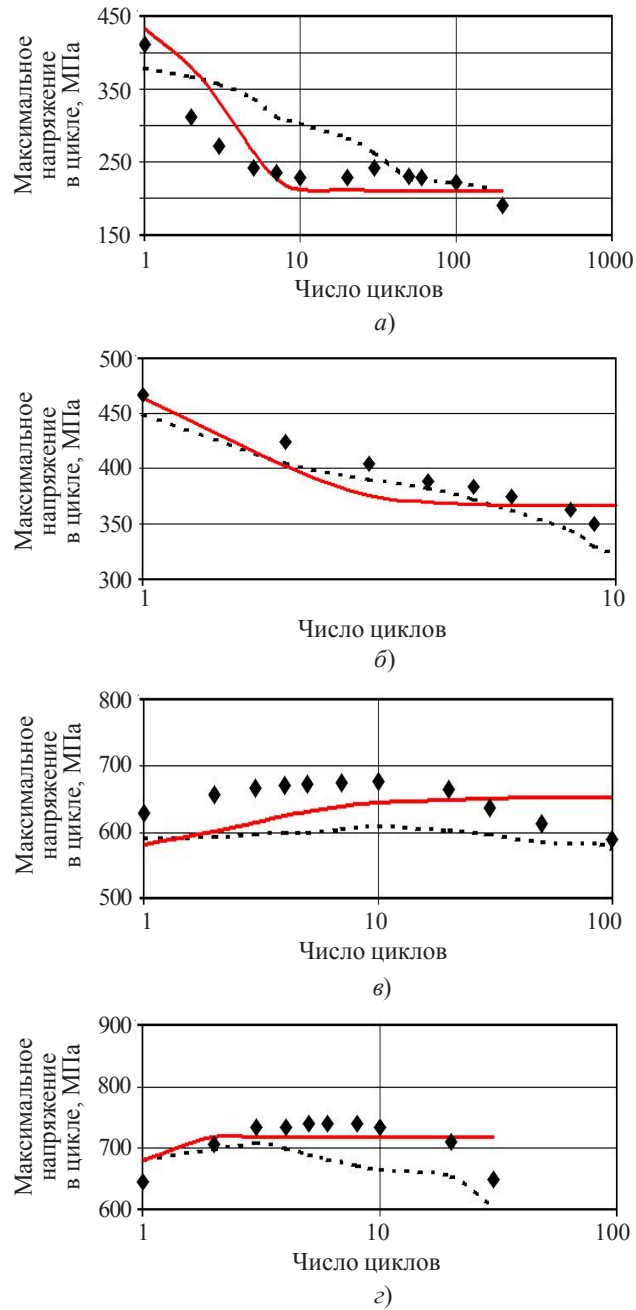


Рис. 3

Видно, что представленная модель циклического термопластического деформирования конструкционного материала достоверно описывает экспериментальные результаты и может в дальнейшем применяться для расчета кинетики процесса накопления усталостных повреждений при циклических синфазных и противофазных термомеханических воздействиях.

Для оценки применимости предложенного эволюционного уравнения накопления усталостных повреждений (11) и исследования влияния траектории деформирования на малоцикловую усталость жаропрочных сплавов были проведены расчеты процессов термоциклического деформирования и усталостной долговечности образцов, выполненных из жаропрочного сплава Nimonic 80A, при различных заданных законах изменения осевой деформации e_{11} и температуры T (см. рис. 1) [9]. Для определения материальных параметров эволюционного уравнения накопления повреждений использовалась точка P на усталостной кривой при изотермическом циклическом деформировании (рис. 4). Материальные параметры эволюционного уравнения накопления повреждений (11) жаропрочного сплава Nimonic 80A приведены в таблице 1.

Результаты расчетов и имеющиеся опытные данные [9] приведены в таблице 4 и на рис. 4–8.

Таблица 4

Амплитуда деформаций и число циклов до разрушения

Режим нагружения		Амплитуда деформаций $e_{11}, \%$	Число циклов до разрушения N_f	
			экспериментальное	расчетное
Изотермический	$T = 571 \text{ }^\circ\text{C}$	0,45	319	367
		0,6	66	66
		0,8	24	20
		1	13	10
	$T = 823 \text{ }^\circ\text{C}$	0,45	128	140
		0,6	65	64
		0,8	51	42
		1	30	25
Неизотермический синфазный		0,45	230	255
		0,6	73	65
		0,8	32	31
		1	20	17
Неизотермический противофазный		0,45	325	255
		0,6	60	64
		0,8	35	30

Результаты изотермических испытаний для температур $T = 571 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T = 823 \text{ }^\circ\text{C}$ изображены на рис. 4а и 4б соответственно. Результаты неизотермических испытаний представлены на рис. 5а при синфазном изменении температуры по отношению к изменению деформации. Результаты неизотермических испытаний для противофазного изменения температуры по отношению к изменению деформации показаны на рис. 5б. Сплошными красными линиями отмечены соответствующие расчетные кривые усталостной долговечности. Маркерами отмечены результаты опытов.

На рис. 6–8 показана зависимость величины поврежденности от числа циклов нагружения N соответственно для двух вариантов нагружения (см. рис. 1б и 1в).

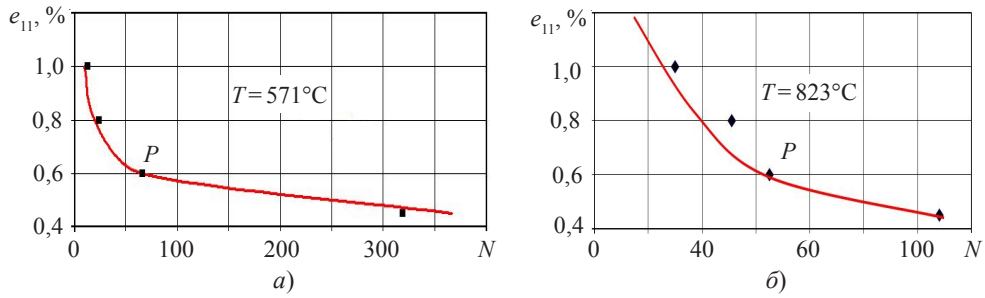


Рис. 4

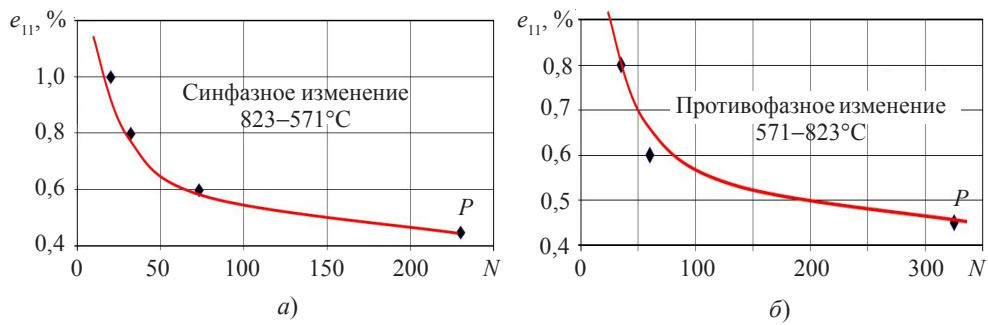


Рис. 5

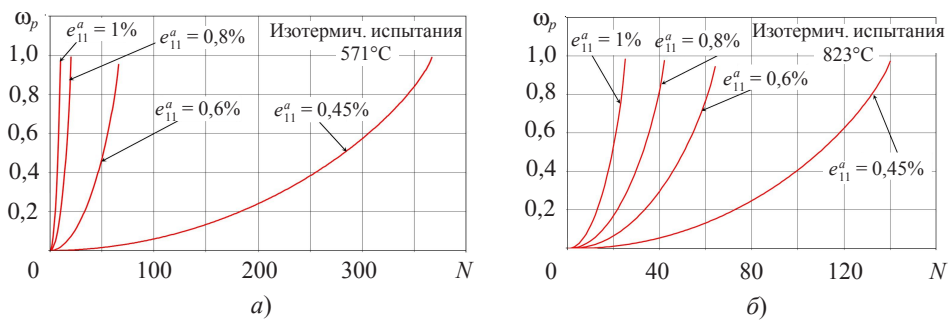


Рис. 6

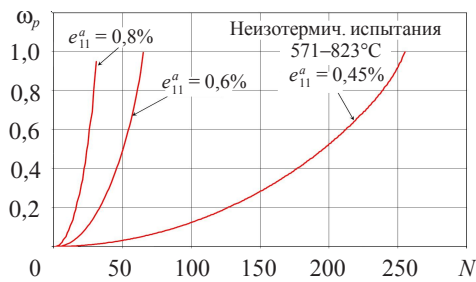


Рис. 7

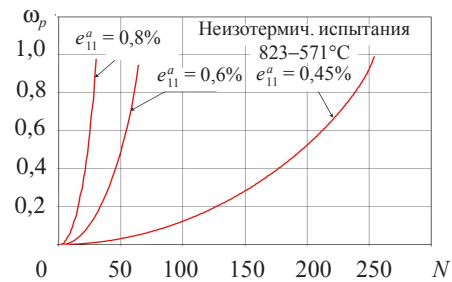


Рис. 8

Из рис. 4–8 и таблицы 4 следует, что:

– для изотермических режимов деформирования при амплитуде деформаций $e_{11} = 0,45\%$ наблюдается существенное влияние температуры на усталостную долговечность сплава: с ростом температуры усталостная долговечность снижается (при

$T = 571$ °С число циклов до разрушения $N_f = 367$, а при $T = 823$ °С $N_f = 140$), с ростом амплитуды деформации эта тенденция исчезает;

– для неизотермических режимов деформирования в данном диапазоне изменения температур (571–823 °С) жаропрочный сплав Nimonic 80А демонстрирует нечувствительность к сдвигу фаз между изменениями температуры и механической деформации.

Заключение

При известных параметрах уравнений циклической термопластичности по одной экспериментальной точке P на усталостной кривой (см. рис. 4) определяются материальные параметры эволюционных уравнений накопления повреждений (11)–(14), с помощью которых кривые малоциклового усталости для различных траекторий деформирования восстанавливаются расчетным путем с высокой точностью.

Оценка адекватности модели поврежденной среды путем сопоставления результатов численных расчетов с известными из литературы опытными данными позволяет утверждать, что развитая в работах [10–13] модель поврежденной среды с достаточной для инженерных расчетов точностью описывает процессы изотермического и неизотермического деформирования и накопления усталостных напряжений при комбинированном термомеханическом нагружении и позволяет рассчитывать малоцикловую усталостную долговечность жаропрочных сплавов при произвольных траекториях деформирования

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 малоциклового прочностии при высоких температурах*. Под ред. С.В. Серенсена. М.: Наука, 1975. 128 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. Темис Ю.М., Азметов Х.Х., Факеев А.И. Моделирование малоциклового усталости при неизотермическом нагружении. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013. Вып. 4. С. 1–13. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/hidden/674.html>
9. 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.
10. Волков И.А., Коротких Ю.Г. *Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями*. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
11. 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.
12. 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.

13. 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.

14. Темис Ю.М., Факеев А.И. Модель кривой неизотермического циклического деформирования. *Проблемы прочности и пластичности*. 2013. Вып. 75. Ч. 1. С. 5–10.

15. Боднер С.Р., Линдхолм У.С. Критерий приращения повреждения для зависящего от времени разрушения материалов. *Труды Америк. об-ва инж.-мех. Сер. Д. Теорет. основы инж. расчетов*. 1976. Т. 100, №2. С. 51–58.

16. Леметр Ж. Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластичных материалов. *Труды Америк. об-ва инж.-мех. Сер. Д. Теорет. основы инж. расчетов*. 1985. Т. 107, №1. С. 90–98.

17. 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. 128 s.

3. Kollinz Dzh. *Povrezhdenie materialov v konstruktsiyakh. 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 konstruktsiy 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 nagruzhении i nagreve. *Mashinovedenie*. 1979. №3. S. 59–65.

8. Темис Ю.М., Азметов К.Х., Факеев А.И. Моделирование малотемпературной усталости при неизотермическом нагружении. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*. 2013. Вып. 4. С. 1–13. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/hidden/674.html>

9. 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.

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

11. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G., Tarasov I.S. Modelirovanie slozhnogo plasticheskogo deformatsionnogo razrusheniya metallov pri mnogoosnom neproportsional'nom nagruzhении. *PMTF*. 2009. Т. 50, №5. С. 193–205.

12. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G., Tarasov I.S. Численное моделирование накопления повреждений при сложном пластическом деформировании. *Вычислительная механика сплошных сред*. 2009. Т. 2, №1. С. 5–18.

13. Volkov I.A., Shishulin D.N., Kazakov D.A., Pichkov S.N. 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.

14. Темис Ю.М., Факеев А.И. Модель кривой неизотермического циклического деформирования. *Проблемы прочности и пластичности*. 2013. Вып. 75. Ч. 1. С. 5–10.

15. Bodner S.R., Lindholm U.S. Критерий приращения повреждения для зависящего от

ot vremeni razrusheniya materialov. *Trudy Amer. ob-va inzh.-mekh. Ser. D. Teoret. osnovy inzh. raschetov.* 1976. T. 100, №2. S. 51–58.

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

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

**MODELING PROCESSES OF INELASTIC DEFORMATION
AND FAILURE OF HEAT-RESISTANT ALLOYS
UNDER CYCLIC THERMAL-MECHANICAL LOADING**

**Korotkikh Yu.G.^{1,3}, Volkov I.A.¹, Igumnov L.A.³,
Shishulin D.N.², Tarasov I.S.¹**

¹*Volga State University of Water Transport, Nizhni Novgorod, Russian Federation*

²*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

³*Research Institute of Mechanics University of Nizhni Novgorod,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

The main laws of deformation and failure accumulation processes in structural materials (metals and alloys) under various modes of combined thermal-mechanical loading are considered, as well as mathematical models of such processes. The main attention is paid to the issues of modeling cyclic elastoplastic deformation and fatigue damage accumulation processes for complex deformation processes accompanied by rotation of main areas of tensor stresses and strains. Results of numerically modeling cyclic elastoplastic deformation and damage accumulation processes in heat-resistant alloys subject to in-phase and anti-phase thermal-mechanical effects. Laws of the effects of change of mechanical deformation and temperature (deformation path type) on fatigue life of heat-resistant steels under non-proportional modes of thermal-mechanical loading are studied. Comparison of the results obtained in calculations with experimental data and numerical results on isothermal and non-isothermal (in-phase and anti-phase) cyclic deformation of laboratory specimens published by other authors show that the model of cyclic thermoplastic deformation of structural materials adequately describes experimental results and can be effectively used for analyzing the kinetics of the fatigue damage accumulation process in materials under cyclic in-phase and counter-phase thermomechanical loading.

Keywords: modeling, thermal-cyclic strength, complex deformation, in-phase and anti-phase loading, mechanics of damaged media, fatigue life, failure.