

УДК 539.3

## МОДЕЛЬ КРИВОЙ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

© 2013 г.

Ю.М. Темис, А.И. Факеев

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова,  
Москва

tejoum@ciam.ru

Поступила в редакцию 11.10.2012

Трехпараметрическая модель, предназначенная для моделирования поведения упругопластического материала под воздействием циклического нагружения при постоянных температурах, обобщена на случай неизотермического нагружения. В зависимости от температуры и пластической деформации в процессе неизотермического циклического нагружения учтены изменения в каждом полцикле размера упругой зоны поверхности нагружения – эффекта Баушингера, нелинейного участка кривой деформирования и модуля упругости. Понятие термомеханической поверхности обобщено на случай циклического деформирования для построения кривой деформирования материала при неизотермическом циклическом нагружении. Проведено сравнение рассчитанных по модели петель циклического упругопластического деформирования и экспериментальных результатов для никелевого сплава при жестком нагружении и действии высоких температур.

*Ключевые слова:* пластичность, циклическое нагружение, неизотермические условия, термомеханическая поверхность.

### 1. Модель материала

Для описания кривых циклического деформирования при постоянной температуре испытаний [1–4] использован подход, получивший экспериментальное подтверждение для ряда конструкционных материалов. На основе этого подхода кривую деформирования каждого полцикла нагружения определяют три параметра: эффект Баушингера, масштаб преобразования нелинейного участка кривой деформирования и модуль упругой разгрузки, зависящие от структурного параметра, в качестве которого использован параметр Одквиста  $\chi(n) = \sum_k^n |\Delta \varepsilon_k^p|$ ,  $\Delta \varepsilon_k^p$  – размах пластической деформации в  $k$ -м полцикле,  $n$  – число полциклов.

При циклическом или сложном неизотермическом нагружении рассмотрим термомеханическую поверхность, участок которой между изотермическими кривыми циклического деформирования [1, 2], соответствующими температурам  $T_1, T_2$  при текущем значении параметра Одквиста, определяют следующие соотношения:

$$\sigma^* = F(\varepsilon^*, T), \quad F = (1 - \lambda)f_1 + \lambda f_2, \quad \lambda = \frac{T - T_1}{T_2 - T_1}, \quad (1)$$

$$f_i = \begin{cases} E(T_i)d(\chi, T_i) \cdot \varepsilon^*, & \varepsilon^* \leq \varepsilon_s^*, \\ E(T_i)d(\chi, T_i)\varepsilon_s^* + d(\chi, T_i)b(\chi, T_i) \left[ f\left(\varepsilon_s + \frac{\varepsilon^* - \varepsilon_s^*}{b(\chi, T_i)}, T_i\right) - \sigma_s(T_i) \right], & \varepsilon^* > \varepsilon_s^*, \end{cases} \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \quad \sigma_s^*(T) = a(\chi, T)\sigma_s(T), \quad \varepsilon_s^* = a(\chi, T)/d(\chi, T)\varepsilon_s,$$

где аналогично [1, 2]  $\sigma^*$  и  $\varepsilon^*$  – соответственно напряжения и деформации в локальной системе координат полуцикла (рис. 1а);  $a(\chi, T)$  – размер упругой зоны поверхности нагружения (эффект Баушингера);  $b(\chi, T)$  – коэффициент преобразования нелинейного участка первоначальной кривой деформирования;  $d(\chi, T)$  – коэффициент изменения модуля упругой разгрузки;  $\varepsilon_s$  и  $\sigma_s$  – деформации и напряжения, соответствующие пределу упругости первоначальной кривой,  $E$  – первоначальный модуль упругости,  $f(\varepsilon_p, T)$  – нелинейная часть кривой циклического деформирования на первом полуцикле,  $f_i$  – кривая циклического деформирования, соответствующая температуре  $T_i$  [1, 2]. Отметим, что  $a(\chi, T)$ ,  $b(\chi, T)$  и  $d(\chi, T)$  – зависящие от  $\chi$  параметры экспериментальной кривой циклического деформирования, полученной при циклических испытаниях при температуре  $T_i$ .

Для моделирования кривой деформирования при неизотермическом циклическом нагружении на каждом  $k$ -м полуцикле нагружения необходимо провести расчет изотермических кривых деформирования  $f_i^{k+1}$  (рис. 1а) для диапазона температур текущего полуцикла. При этом необходимо учесть накопленную пластическую деформацию  $\chi$  за предыдущие полуциклы и построить по полученным кривым деформирования  $F^{k+1}$  – термомеханическую поверхность текущего  $k+1$  полуцикла (рис. 1б), на которой в пространстве напряжений, температур и деформаций находится неизотермическая кривая циклического деформирования  $k+1$  полуцикла. Определение параметров этой кривой происходит с учетом направления деформирования.

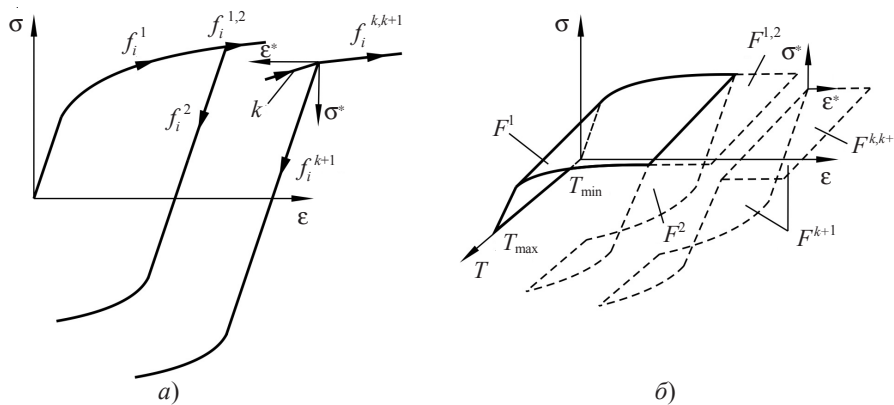


Рис. 1

## 2. Определение параметров модели материала

Построение участка термомеханической поверхности требует определения параметров модели материала, к которым относятся первоначальные кривые деформирования материала, полученные при постоянных температурах, и параметры  $a(\chi, T)$ ,  $b(\chi, T)$ ,  $d(\chi, T)$ , моделирующие для разных температур испытаний измене-

ние циклических свойств от накопленной пластической деформации при изотермическом нагружении. Таким образом, параметры модели определяют обработкой экспериментальных кривых циклического деформирования при жестком или мягком типе нагружения, полученных при постоянной температуре испытаний.

Для установления связи параметров с накопленной пластической деформацией необходимо из циклических испытаний на каждом полцикле определить зависимость от числа полциклов накопленной пластической деформации  $\chi(n)$  и трех параметров модели кривой циклического деформирования.

Параметр  $a(n, T)$ , моделирующий изменение размера упругой области, определяется отношением предела текучести в  $n$ -м полцикле в локальных координатах к первоначальному пределу текучести:

$$a(n, T_i) = \sigma_s^*(n, T_i) / \sigma_s(T_i).$$

Для определения параметра  $b(n, T)$ , моделирующего масштаб преобразования нелинейного участка кривой деформирования, использован метод наименьших квадратов, обеспечивающий минимальное отклонение модельной кривой  $n$ -го полцикла от экспериментальной.

В случае мягкого нагружения параметр  $b(n, T)$  можно приближенно определить по формуле

$$b(n, T_i) = \Delta \varepsilon_p^0 / \Delta \varepsilon_p^n,$$

где  $\Delta \varepsilon_p^0$  – остаточные пластические деформации начального, а  $\Delta \varepsilon_p^n$  –  $n$ -го полциклов.

Параметр  $d(n, T)$ , моделирующий изменение модуля упругости в процессе циклического деформирования, определяется отношением модуля упругости на текущем  $n$ -м полцикле к первоначальному:

$$d(n, T_i) = E(n, T_i) / E(1, T_i).$$

После определения зависимостей  $\chi(n, T)$ ,  $a(n, T)$ ,  $b(n, T)$ ,  $d(n, T)$  для каждой температуры можно получить осредненные зависимости  $a(\chi, T)$ ,  $b(\chi, T)$  и  $d(\chi, T)$  в требуемом диапазоне температур.

### 3. Верификация модели

На основе соотношений (1), (2) разработаны программы обработки экспериментальных данных и моделирования испытаний образцов при неизотермическом циклическом деформировании, тестирование которых проводилось сопоставлением результатов расчетов с экспериментальными результатами по изотермическому и неизотермическому циклическому деформированию гладких образцов.

В работе [5] представлены экспериментальные результаты по циклическому 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 от 571 до 823 °С. Изотермические (рис. 2а) и неизотермические испытания проводились при жестком нагружении, амплитуда деформации в экспериментах с постоянной температурой составляла 1%. При переменных температурах приведены результаты эксперимента с амплитудами от 0,45 до 1%. Температура в неизотермических

испытаниях изменялась как синфазно (рис. 2б), так и противофазно (рис. 2в) по отношению к изменению деформаций.

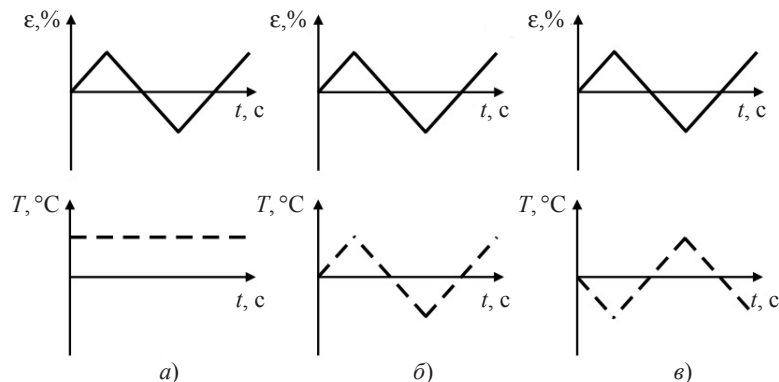


Рис. 2

На рис. 3а приведено сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных для стабилизированной петли циклического деформирования при температуре 700 °С (тип нагружения показан на рис. 2а), амплитуда деформаций составляет 1%. Здесь и далее квадратными маркерами отмечены результаты эксперимента, сплошные линии – результаты численного моделирования по предложенной модели. На рис. 3б приведено сравнение стабилизированных петель циклического неизо термического деформирования при синфазном нагружении (см. рис. 2б): 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. 3в приведено сравнение результатов моделирования неизо термического циклического нагружения при противофазном нагружении (см. рис. 2в), 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. 3г приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных крайних точек стабилизированных кривых неизо термического циклического деформирования при различных программах нагружения. Треугольниками обозначены экспериментальные данные стабилизированных циклов неизо термического циклического деформирования при противофазном нагружении (см. рис. 2в) с амплитудами деформаций 0,45, 0,6, 0,8 и 1%. Квадратами показаны экспериментальные данные стабилизированных циклов при синфазном нагружении (см. рис. 2б) при тех же амплитудах деформаций. Приведены крайние точки стабилизированных кривых деформирования. Сплошными линиями показаны расчетные зависимости крайних точек стабилизированных циклов деформирования от амплитуд деформирования при синфазном нагружении, а пунктирными линиями – при противофазном нагружении.

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. 4. Рисунок 4а соответствует синфазному нагружению с амплитудой деформаций 0,45%,

а рис. 4б – с амплитудой деформаций 1%; рис. 4в соответствует противофазному нагружению с амплитудой 0,45%, а рис. 4г – с амплитудой 1%.

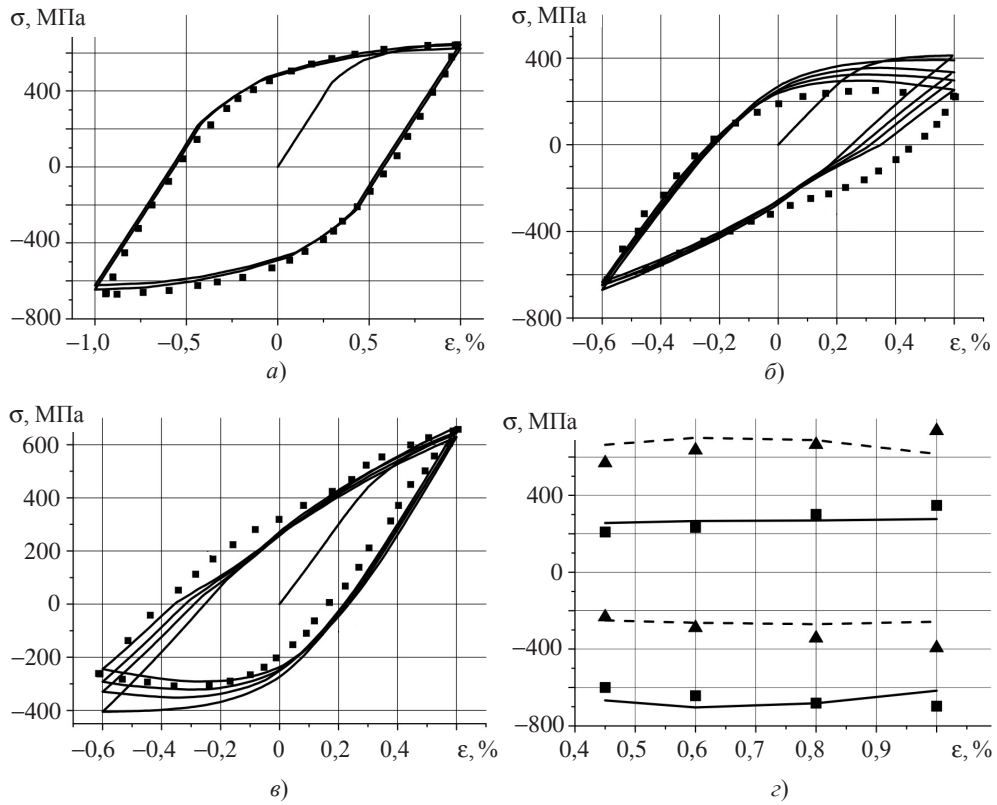


Рис. 3

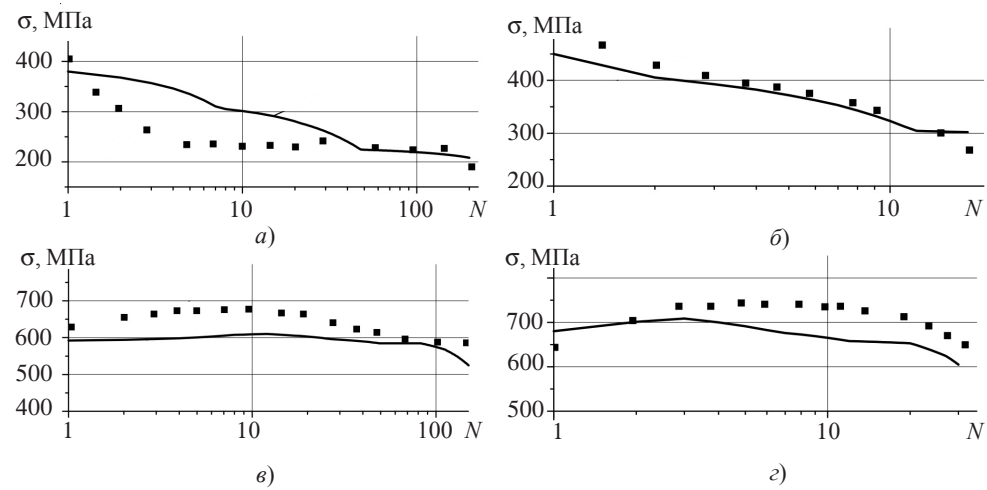


Рис. 4

Результаты показывают, что представленная в работе модель циклического деформирования конструкционного материала адекватно описывает экспериментальные результаты и может в дальнейшем быть применена для расчета кинетики на-

пряжений и ресурса деталей машин при циклическом неизотермическом нагружении.

#### *Список литературы*

1. Темис Ю.М. Пластичность и ползучесть деталей ГТД при циклическом нагружении // Проблемы прочности и динамики в авиадвигателестроении: Труды ЦИАМ. 1989. Вып. 4, №1237. С. 32–50.
2. Темис Ю.М., Пучков И.В. Характеристики упругопластического деформирования и повреждаемости конструкционных материалов при циклическом нагружении // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 1992. С. 82–89.
3. Темис Ю.М. Моделирование процессов неизотермического упругопластического деформирования в деталях энергосиловых установок // В кн.: Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (предс.) и др. Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин. Т. 1–3 в 2-х книгах. Кн. 1 / Под общ. ред. К.С. Колесникова. М.: Машиностроение, 1994. С. 263–268.
4. Temis Yu.M., Azmetov Kh.Kh., Zuzina V.M. Low-cycle fatigue simulation and life-time prediction of high stressed structures // Solid State Phenomena. Trans. Tech. Publications. Switzerland. 2009. V. 147–149. P. 333–338.
5. Liang Jin, Pelloux R.M., Xie Xishan. Thermomechanical fatigue behavior of a nickel base superalloy // Chin. J. Met. Sci. Technol. 1989. V. 5. P. 1–7.

#### **MODELING THE NON-ISOTHERMAL CYCLIC DEFORMATION CURVE**

**Yu.M. Temis, A.I. Fakeev**

The three-parameter model designed for modeling the behavior of elastoplastic materials under cyclic loading for constant temperatures is generalized for the case of non-isothermal loading. The half-cycle variation of Bauschinger effect, of the non-linear part of the deformation curve and of Young's modulus as a function of temperature and plastic strain are accounted for. The notion of thermal-mechanic surface is generalized for the case of cyclic deformation for constructing the deformation curve of a material under non-isothermal cyclic loading. The cyclic elastoplastic deformation loops constructed using the model are compared with the experimental data for a nickel alloy under hard loading and exposure to high temperatures.

*Keywords:* plasticity, cyclic loading, non-isothermal conditions, thermo-mechanic surface.