

5. Темис Ю.М., Пучков И.В. Характеристики упругопластического деформирования и повреждаемости конструкционных материалов при циклическом нагружении // Межвуз. сборник «Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения». – Изд-во Нижегородского университета, 1992. – с.82-89.
6. Темис Ю.М. Пластичность и ползучесть в инженерных расчетах. Аналитические и численные методы в решении граничных задач пластичности и вязкоупругости. Свердловск, АН СССР, 1986. – С. 100-106.
7. I.V. Putchkov, J.M. Temis, A.L. Dowson, D. Damri: Development of a finite element based strain accumulation model for the prediction of fatigue lives in highly stressed Ti components // *Int.J. Fatigue*. Vol.17, No 6, 1995. – pp. 385-398.
8. Мэнсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. / Пер. с англ. - М.: Машиностроение, 1974. – 344 с.

### **Моделирование кривых деформирования и ресурса конструкционного материала при циклическом неизотермическом нагружении**

д.т.н., проф. Темис Ю.М., Факеев А.И.  
МГТУ «МАМИ»

(495) 223-05-23, доб. 1318, tm@mami.ru

*Аннотация:* Предложена модель упругопластического материала при циклическом неизотермическом нагружении. Проведено сравнение рассчитанных по модели петель циклического упругопластического деформирования и экспериментальных результатов стали X18H9 при жестком нагружении и действии высоких температур. Проведено сравнение модели малоцикловой усталости, основанной на накопленной пластической деформации с формулой Мэнсона при повышенных температурах.

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

Трехпараметрическая модель [1], предназначенная для расчета пластических деформаций при циклическом нагружении в изотермических условиях, обобщена на случай неизотермического нагружения. Это позволило описывать кривые циклического деформирования, учитывая эффект Баушингера, изменение модуля разгрузки и различные масштабы преобразования линейного и нелинейного участков первоначальных кривых деформирования, полученных при разных температурах. Показано, что существует зависимость, связывающая число циклов до разрушения образца с накопленной при высоких температурах пластической деформацией. На основе этой зависимости произведена оценка усталостной долговечности образцов.

**1. Моделирование кривых циклического деформирования.** Подход, основанный на описании кривых циклического деформирования в зависимости от структурного параметра, в качестве которого принят параметр Одквиста  $\chi = \sum_i^n |\Delta \varepsilon_i^p|$ , получил экспериментальное подтверждение при постоянной температуре для ряда конструкционных материалов [2]. В работе [3] предложено использовать понятие о термомеханической поверхности - поверхности неизотермического пластического деформирования

$$\sigma = F(\varepsilon_p, T). \quad (1)$$

Однако термомеханическая поверхность, построенная по изотермическим кривым деформирования, полученным при постоянных температурах испытаний, справедлива только для процессов, при которых не происходит изменение направления деформирования. При

циклическом или сложном неизотермическом нагружении предлагается рассмотреть поверхность неизотермического деформирования, участок которой между изотермическими кривыми циклического деформирования, соответствующих температурам  $T_1, T_2$  при текущем значении параметра Одвишта определяется следующими соотношениями:

$$\sigma^* = F(\varepsilon_p^*, T), \quad (2)$$

$$F = (1 - \lambda)f_1 + \lambda f_2, \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{T - T_1}{T_2 - T_1}, \quad (4)$$

$$f_i = \begin{cases} E(T_i) \cdot d_\chi(T_i) \cdot \varepsilon^*, & \varepsilon^* \leq \varepsilon_s^* \\ E(T_i) \cdot d_\chi(T_i) \cdot \varepsilon_s^* + d_\chi(T_i) \cdot b_\chi(T_i) \cdot \left[ f\left(\varepsilon_s + \frac{\varepsilon^* - \varepsilon_s^*}{b_\chi(T_i)}, T_i\right) - \sigma_s(T_i) \right], & \varepsilon^* > \varepsilon_s^* \end{cases}, \quad (5)$$

$i = 1, 2$

$$\sigma_s^*(T) = a_\chi(T) \sigma_s(T), \varepsilon_s^* = a_\chi(T) / d_\chi(T) \varepsilon_s, \quad (6)$$

где:  $\sigma^*$  и  $\varepsilon^*$  – соответственно напряжения и деформации в локальной системе координат;

$a_\chi$  – размер упругой зоны поверхности нагружения;

$b_\chi$  – коэффициент преобразования нелинейного участка кривой деформирования;

$d_\chi$  – коэффициент изменения модуля упругой разгрузки;

$\varepsilon_s$  и  $\sigma_s$  – деформация и напряжения в пределе упругости первоначальной кривой,

$E$  – первоначальный модуль упругости.

На основе (1)-(6) разработана программа для моделирования испытаний образцов при неизотермическом циклическом деформировании. Для каждого  $k$ -ого полуцикла нагружения рассчитывались:

- изотермические кривые циклического деформирования для температур текущего полуцикла при текущей накопленной пластической деформации;
- текущая термомеханическая поверхность, которая определялась по накопленной пластической деформации за предыдущие  $k-1$  полуцикл (рисунок 1);
- в пространстве напряжений, температур и деформаций неизотермическая кривая циклического деформирования.

Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными результатами [4] для битермальных циклов стали X18H9. Параметры модели рассчитаны по экспериментальным данным изотермического нагружения образцов при температурах  $150^\circ$  и  $650^\circ$ . Сравнение проводилось для нескольких первых циклов нагружения, при которых временные эффекты не успевали проявиться. Циклы симметричны по пластическим деформациям, амплитуда пластических деформаций равнялась 1,6%.

Кривые деформирования и параметры модели при разных температурах показаны на рисунке 2. Для проверки модели проведены расчеты для битермальных циклов: температура в каждом полуцикле менялась от  $150^\circ$  до  $650^\circ$  (первый тип нагружения) или от  $650^\circ$  до  $150^\circ$  (второй тип нагружения). Результаты расчета сопоставлены с экспериментальными результатами для каждой программы нагружения соответственно на первом, втором и седьмом, восьмом полуциклах (рисунки 3 и 4). Из сравнения следует, что модель адекватно описывает поведение материала при циклическом неизотермическом нагружении.

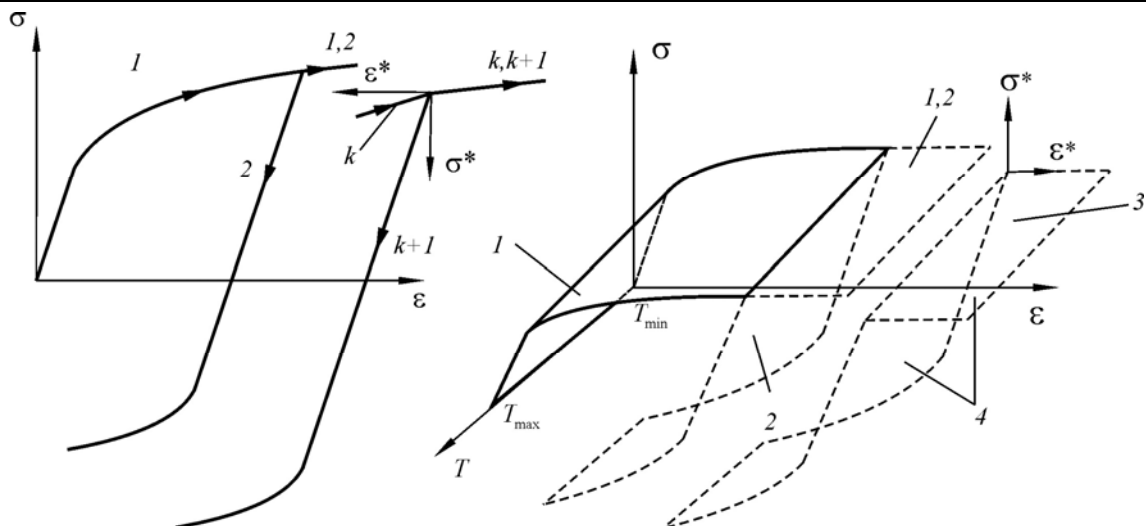


Рисунок 1 – Семейство термомеханических поверхностей: 1.- исходная; 2.- на втором полуцикле; 3.-на k полуцикле; 4.- на k+1 полуцикле.

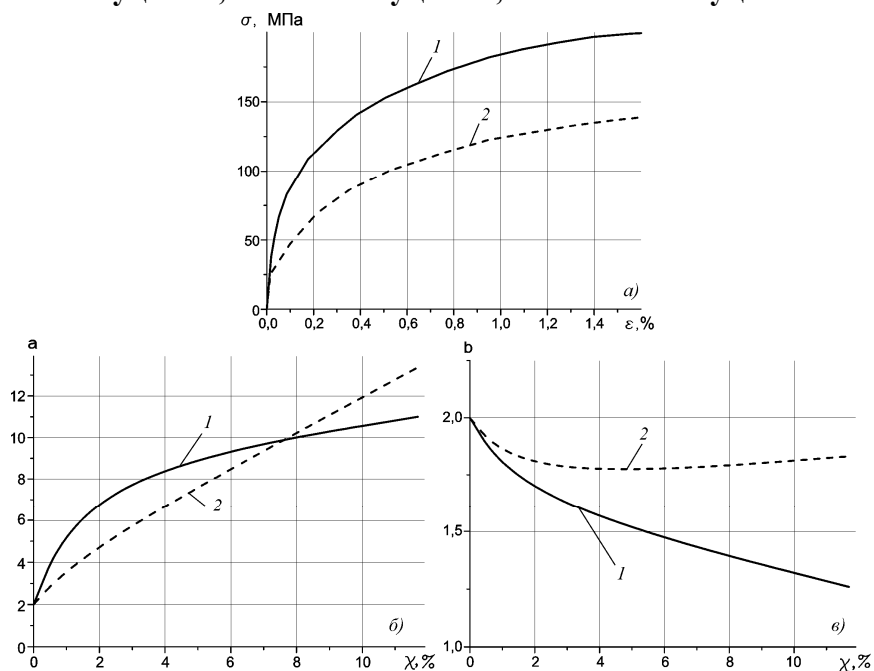


Рисунок 2 – Кривые деформирования (а) и параметры модели материала X18N9 (б, в) при температурах: 1- 150°; 2 - 650°

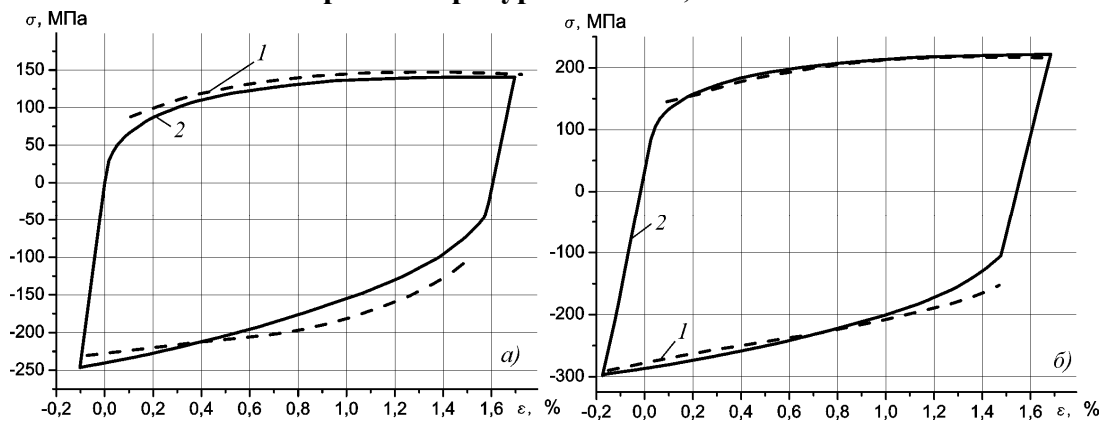
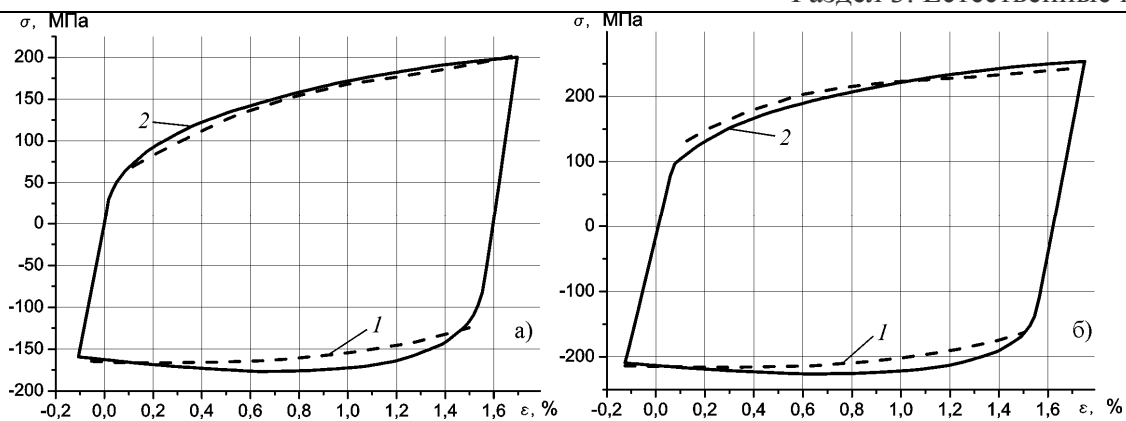


Рисунок 3 – Полуциклы при неизотермическом нагружении при первом типе нагружения : а) - 1-2; полуциклы, б) - 7-8 полуциклы (1 - эксперимент, 2 - расчет)



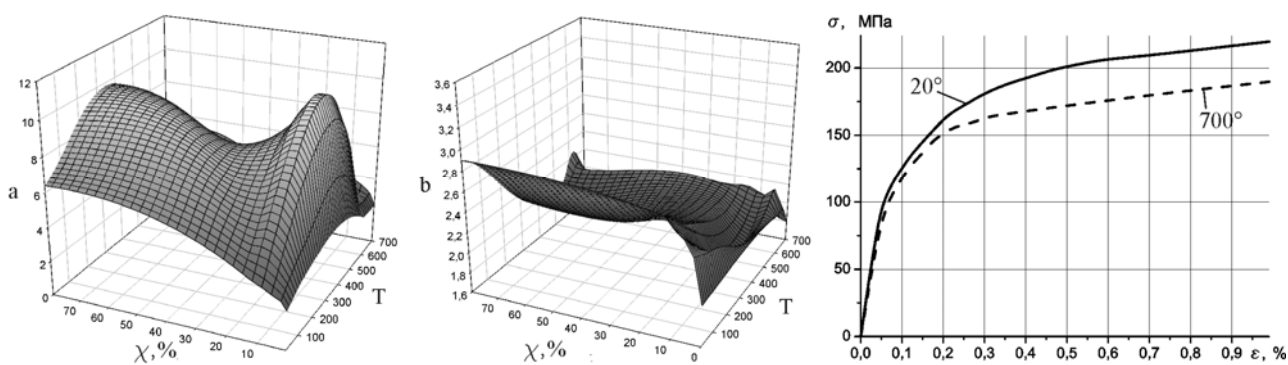
**Рисунок 4 – Полуциклы при неизотермическом нагружении при втором типе нагружения: а) - 1-2 полуциклы, б) - 7-8 полуциклы (1 - эксперимент, 2 - расчет )**

**2. Модель долговечности.** В работах [2, 8, 9] экспериментально установлено, что при различных программах нагружения конструкционных материалов (постоянный размах напряжений, постоянный размах деформаций, случайный размах напряжений) число полуциклов  $n_f$  до разрушения при знакопеременном пластическом деформировании связано с предельной величиной  $\chi_{max}$  зависимостью:

$$n_f = (\chi_{max} / \delta)^\gamma, \tag{7}$$

где:  $\delta$  и  $\gamma$  - постоянные материала для данной температуры и  $\chi = \sum_i^n |\Delta \varepsilon_i^p|$ .

В настоящей работе зависимость величины накопленной пластической деформации  $\chi_{max}$  в зависимости от числа полуциклов и от температуры исследована при жестком нагружении образцов стали X16N11M3 для амплитуд деформации  $\varepsilon_a$  0,5÷10,0 % на основе экспериментальных результатов по изотермическому циклическому нагружению и малоциклового усталости стали X16N11M3 при температуре 20°, 600°, 650° и 700° [5]. Параметры моделирования, кривые деформирования показаны на рисунке 5. Параметр  $d_\chi$  принят равным единице, т.е. считалось что модуль упругости при циклическом нагружении постоянен. Зависимость (7) для разных температур показана на рисунке 6.



**Рисунок 5 – Параметры модели материала X16N11M3 при разных температурах**

Проведены расчеты траектории накопленной пластической деформации при различных значениях амплитуды деформации  $\varepsilon_a$  в диапазоне 0,5÷10,0 % при температурах 20°, 600°, 650° и 700°. Пример результатов расчета для температур 20° и 700° приведен на рисунке 7. Усталостная диаграмма в координатах  $(\varepsilon_a, N=n/2)$  приведена на рисунке 8. Для сравнения приведены результаты расчета по формуле Мэнсона:

$$\Delta \varepsilon = c N_F^{-\alpha} + B \cdot N_F^{-\beta}, \tag{8}$$

Параметры формулы Мэнсона при разных температурах

| T    | c    | $\alpha$ | $\beta$ | B     |
|------|------|----------|---------|-------|
| 20°  | 0,17 | 0,5      | 1146    | 0,15  |
| 600° | 0,2  | 0,6      | 986     | 0,192 |
| 700° | 0,18 | 0,7      | 598     | 0,18  |

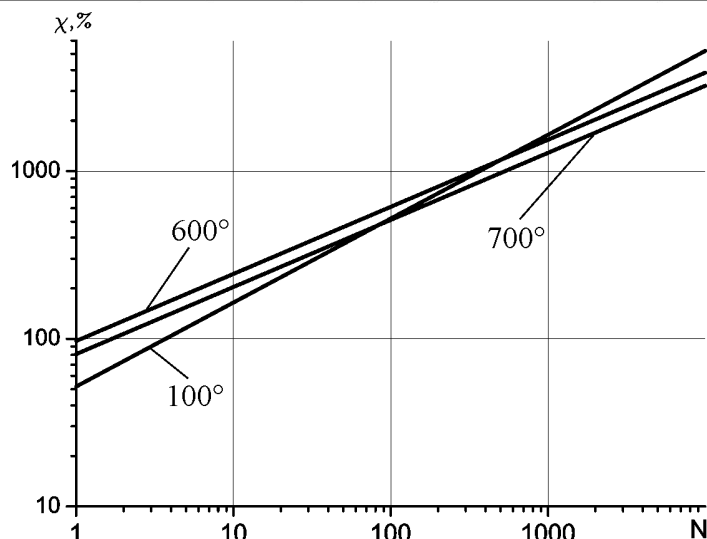


Рисунок 6 – Зависимости накопленной пластической деформации от числа полуциклов для разных температур (слева), кривые деформирования (справа) для стали X16N11M3

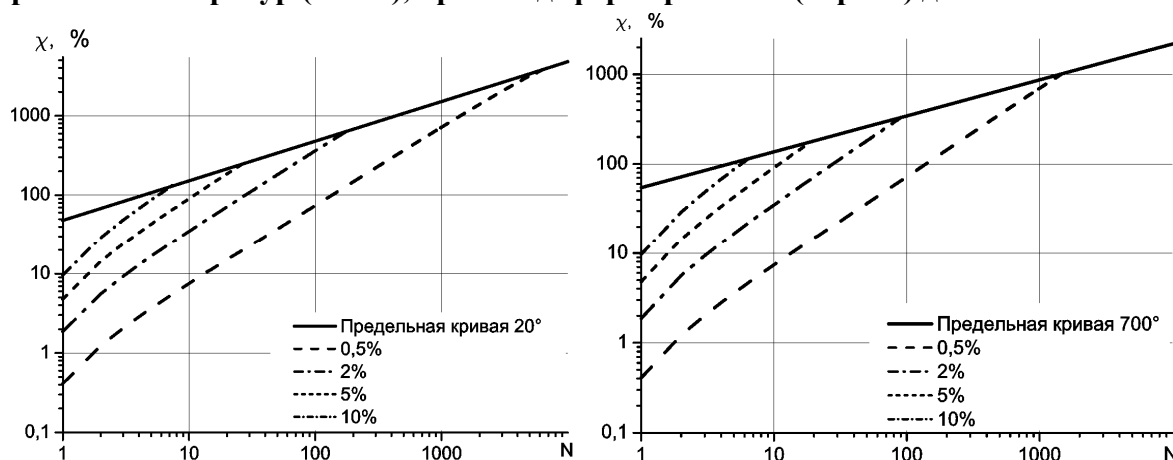


Рисунок 7 – Характер изменения величины накопленной пластической деформации  $\chi$  стали X16N11M3 при жестком нагружении для различных значений амплитуды деформации при температурах 20°(слева) и 700°(справа)

Представленные результаты показывают, что семейство термомеханических поверхностей может быть использовано для моделирования кривых циклического деформирования при неизотермическом нагружении, особенно в условиях ограниченного объема экспериментальных данных. На основе этой модели может быть создан комплекс программ расчета кинетики напряжений и деформаций при циклическом неизотермическом нагружении деталей машин, в основе которого будет лежать примененная теория малых упругопластических деформаций, обобщенная на случай циклического нагружения [1, 6, 7]. Также показано, что применение модели малоциклового усталости, основанной на суммарной накопленной пластической деформации возможно при высоких температурах.

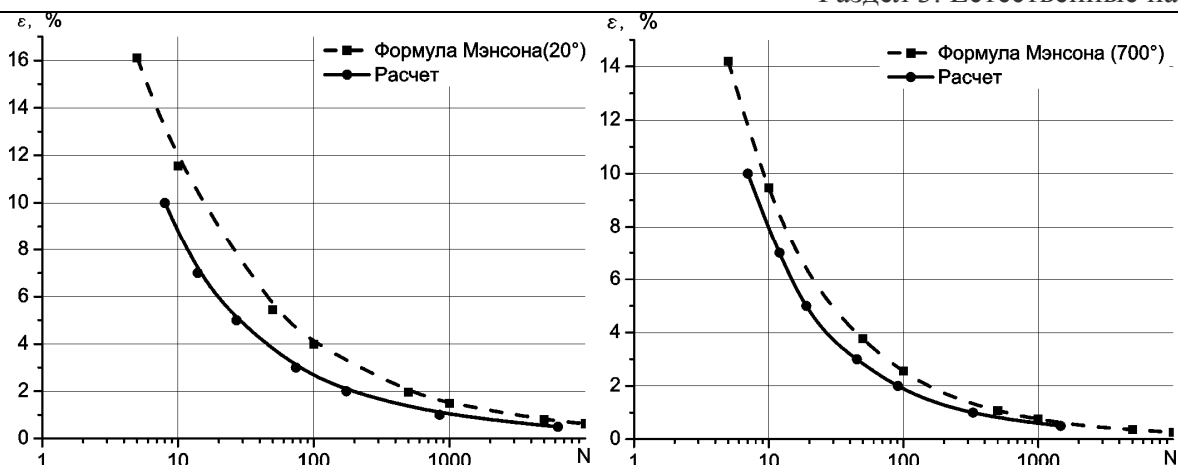


Рисунок 8 – Диаграмма МЦУ стали X16N11M3 при жестком нагружении

#### Литература

1. Темис Ю.М. Пластичность и ползучесть деталей ГТД при циклическом нагружении. В кн.: Проблемы прочности и динамики в авиадвигателестроении. Вып.4. - Труды ЦИАМ, № 1237, 1989. - с. 32-50.
2. Темис Ю.М., Пучков И.В. Характеристики упругопластического деформирования и повреждаемости конструкционных материалов при циклическом нагружении. Межвуз. сборник «Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения». – Изд-во Нижегородского университета, 1992. – с. 82-89
3. Термопрочность деталей машин: Справочник. Под ред. И.А. Биргера и Б.Ф. Шорра. М.: Машиностроение, 1975. 455с..
4. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Гохфельд Д.А. и др. Уравнения состояния при малоцикловом нагружении. М.: Наука, 1981. 245 с.
5. Гохфельд Д.А., Гецов Л.Б., Кононов К.М. и др. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении. Екатеринбург, 1996. 408 с.
6. Москвитин В. В. Циклические нагружения элементов конструкций. М: Наука, 1981. 344с.
7. Темис Ю.М. Прикладные методы решения задач термопластичности, Энциклопедия «Машиностроение». Том1-III, книга 1. - М: Машиностроение, 1994. с.231-236.
8. Темис Ю.М. Пучков И.В. Модель упругопластического деформирования и повреждаемости конструкционных материалов - Материалы V Всесоюзного семинара «Малоцикловая усталость – критерий разрушения и структуры материалов». Тезисы докладов и сообщений. – Волгоград, 1987.
9. Темис Ю.М., Пучков И.В. Аналитическое описание кривых циклического деформирования конструкционных материалов. - Проблемы прочности, 1988. – № 9. – с. 18-22.