

УДК 621.039.53

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ТЕРМОПУЛЬСАЦИЯХ

© 2014 г.

**М.А. Большухин, В.В. Лебедев, А.В. Козин,
Ю.Г. Коротких, В.А. Панов, В.А. Пахомов**

ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

varanov@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию 28.03.2014

Приведены уравнения механики поврежденной среды для моделирования процессов упругопластического неизотермического деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах при термомеханических нагружениях. Результаты расчетов процессов накопления повреждений при термопульсациях сопоставляются с экспериментальными результатами.

Ключевые слова: термомеханическое нагружение, термопульсации, математические модели, упругопластическое деформирование, повреждение.

Для моделирования процессов неизотермического упругопластического деформирования и накопления повреждений при нерегулярных термомеханических нагружениях в конструкционных сталях использовалась математическая модель механики поврежденной среды. Данная модель основана на введении макроскопических параметров, интегрально описывающих структурные изменения материала на мезоуровне в процессе деформирования и накопления повреждений [1, 2], она позволяет моделировать эффекты: монотонное и циклическое упрочнение материалов при пропорциональном и непропорциональном термомеханическом нагружении; локальную анизотропию пластического деформирования в районе излома траектории деформирования; основные стадии процесса рассеянных по объему материала повреждений; нелинейные процессы накопления и суммирования повреждений; влияние вида траектории деформирования, вида напряженного состояния и истории деформирования на темпы накопления повреждений.

Модель поврежденной среды состоит из трех взаимосвязанных частей: соотношений, определяющих упругопластическое неизотермическое поведение материалов; уравнений кинетики рассеянных по объему материала повреждений до зарождения макротрещины; критериев зарождения макроскопической трещины в данном объеме материала.

1. Математическая модель неизотермического упругопластического деформирования

Связь между напряжениями σ_{ij} и компонентами тензора упругих деформаций e_{ij}^e описывается соотношениями [1, 2]:

$$\sigma = 3K[e - \alpha(T - T_0)], \quad \sigma'_{ij} = 2Ge'_{ij}, \quad e'_{ij} = e'_{ij} - e^p_{ij} - e^c_{ij}, \quad (1)$$

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

где $\sigma, \Delta\sigma, e, \Delta e$ – шаровые, $\sigma'_{ij}, \Delta\sigma'_{ij}, e'_{ij}, \Delta e'_{ij}, \Delta e^p_{ij}$ – девиаторные компоненты тензоров напряжений и деформаций и их приращений; e^p_{ij}, e^c_{ij} – деформации пластичности и ползучести; T – температура; K, G, α – модуль объемного расширения, модуль сдвига и коэффициент линейного расширения.

Уравнение поверхности текучести в пространстве девиаторов напряжений представляет собой сферу с радиусом C_p и координатами центра ρ_{ij} (тензора микронапряжений ρ_{ij}):

$$F_p = [(\sigma'_{ij} - \rho_{ij})(\sigma'_{ij} - \rho_{ij})] - C_p^2 = 0 \quad \text{или} \quad (S_{ij}S_{ij})^{1/2} - C_p = 0, \quad S_{ij} = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}. \quad (2)$$

Уравнение поверхности «памяти» материала запишется в виде:

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

где ρ_{\max} – максимальный на данный момент истории нагружения модуль тензора ρ_{ij} .

Для приращения радиуса поверхности текучести ΔC_p эволюционное уравнение имеет вид:

$$\Delta C_p = \bar{q}_\chi \Delta\chi H(F_p) + q_T \Delta T + a_\chi (\bar{Q}_s - C_p) \Delta\chi \Gamma(F_p) + \Delta C_{0T}, \quad (4)$$

$$C_p = C_{p0} + \sum \Delta C_p,$$

$$\bar{q}_\chi = \frac{q_c A \psi_1 + (1 - A) q_\chi}{\psi_1 A + (1 - A)}, \quad \bar{Q}_s = \frac{Q_c A \psi_2 + (1 - A) Q}{\psi_2 A + (1 - A)}, \quad (5)$$

$$A = 1 - \cos^2 \theta, \quad \cos \theta = n^e_{ij} n^s_{ij}, \quad n^e_{ij} = \frac{\Delta e'_{ij}}{(\Delta e'_{ij} \Delta e'_{ij})^{1/2}}, \quad n^s_{ij} = \frac{S_{ij}}{(S_{ij} S_{ij})^{1/2}},$$

$$H(F_p) = \begin{cases} 1 & \text{при } F_p = 0 \text{ и } \rho_{ij} \Delta \rho_{ij} \geq 0, \\ 0 & \text{при } F_p < 0 \text{ или } \rho_{ij} \Delta \rho_{ij} < 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$\Gamma(F_p) = 1 - H(F_p), \quad \Delta\chi = \left(\frac{2}{3} \Delta e^p_{ij} \Delta e^p_{ij} \right)^{1/2},$$

$$\chi_m = \sum \Delta\chi H(F_p), \quad \chi = \sum \Delta\chi.$$

Здесь q_c и Q_c – значения модулей монотонного и циклического упрочнения при изломе траектории деформирования на угол $\pi/2$, q_χ и Q – модули монотонного и циклического упрочнения при пропорциональном нагружении материала ($A = 0$), a_χ – параметр циклического упрочнения; Q_s – стационарное циклическое значение радиуса поверхности текучести; $H(F_p)$ и $\Gamma(F_p)$ – операторы монотонного и циклического нагружения; C_{p0} – начальный радиус поверхности текучести.

Эволюционное уравнение для координат центра поверхности текучести ρ_{ij} имеет вид:

$$\Delta \rho_{ij} = g_1 \Delta e^p_{ij} - g_2 \rho_{ij} \Delta \chi_p - g_T \rho_{ij} \langle \Delta T \rangle, \quad (7)$$

где g_1, g_2 – модули кинематического упрочнения; модуль g_T описывает изменение координат центра поверхности текучести в связи с повышением температуры T :

$$g_T = \frac{\Delta g_1}{g_1 \Delta T} - \frac{\Delta g_2}{g_2 \Delta T} > 0 \text{ при } \Delta T > 0, \quad g_T = 0 \text{ при } \Delta T \leq 0. \quad (8)$$

Эволюция поверхности «памяти» материала (3) определяется уравнением:

$$\Delta \rho_{\max} = \frac{(\rho_{ij} \Delta \rho_{ij}) H(F_\rho)}{(\rho_{ij} \rho_{ij})^{1/2}} - g_2 \rho_{\max} \Delta \chi - g_T \rho_{\max} \langle \Delta T \rangle - g_{0T} \rho_{\max}, \quad (9)$$

$$\langle \Delta T \rangle = \begin{cases} \Delta T & \text{при } \Delta T > 0, \\ 0 & \text{при } \Delta T \leq 0, \end{cases} \quad g_{0T} > 0.$$

2. Математическая модель процессов накопления усталостных повреждений

Для моделирования процессов накопления повреждений вводится мера поврежденности – скалярный параметр ω , коррелирующий с относительной объемной долей дефектов в данном объеме материала. Общую структуру эволюционного уравнения для $\Delta \omega$ можно представить в виде [1–3]:

$$\Delta \omega = f_1(\theta) f_2(\beta) f_3(\omega) f_4(z) \langle \Delta z \rangle. \quad (10)$$

Функции f_i описывают: $f_1(\theta)$ – влияние параметров траектории деформирования; $f_2(\beta)$ – влияние вида («жесткости») напряженного состояния; $f_3(\omega)$ – влияние накопленной поврежденности; $f_4(z)$ – влияние накопленной относительной энергии W_p , затраченной на образование дефектов; θ – угол излома траектории деформирования в точке нагружения; $\beta = \sigma/\sigma_u$ – параметр жесткости напряженного состояния, $\sigma_u = (\sigma'_{ij} \sigma'_{ij})^{1/2}$;

$$z = \frac{W_p - W_a}{W_f - W_a}, \quad W_p = \sum \langle \rho_{ij} \Delta e_{ij}^p \rangle, \quad (11)$$

где W_p – текущее значение энергии; W_a – значение этой энергии, соответствующее инкубационной стадии процесса накопления повреждений; W_f – значение этой энергии, соответствующее зарождению макроскопической трещины $\sim 1 \div 2$ мм.

Уравнение (10) интегрируется совместно с уравнениями (1)–(9) вдоль траектории деформирования.

Одно из простейших корректных представлений уравнения (10) для процессов упругопластического деформирования имеет вид [1, 2]:

$$d\omega = \frac{\alpha + 1}{r + 1} f(\beta) z^\alpha (1 - \omega)^{-r} dz, \quad (12)$$

$$f(\beta) = e^{a\sqrt{\beta}}, \quad a = \begin{cases} a_2 & \text{при } \beta > 0, \\ a_1 & \text{при } \beta \leq 0, \end{cases} \quad (13)$$

где α , r – экспериментально определяемые параметры материала, e – основание натуральных логарифмов.

Интеграл уравнения (12) вдоль траектории деформирования имеет вид:

$$\omega = 1 - \left\{ 1 - (\alpha + 1) \int_0^z f(\beta) z^\alpha dz \right\}^{1/(r+1)}. \quad (14)$$

В ОАО «ОКБМ Африкантов» разработан программный комплекс «Ресурс-НН» [4, 5], который позволяет по заданной истории изменения компонент тензора полных деформаций $e_{ij}(t)$ и температуры $T(t)$ рассчитывать параметры процессов неизотермического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений. С помощью этого программного комплекса для ряда конструкционных материалов проведена верификация уравнений (1)–(14) для различных изотермических и неизотермических пропорциональных и непропорциональных процессов. Оценка адекватности проводилась путем сопоставления результатов расчетного анализа по программе «Ресурс-НН» с результатами экспериментальных исследований [1].

На базе данной математической модели разработан метод оценки выработанного и прогноза остаточного ресурса в контролируемых зонах конструктивных узлов инженерных объектов в процессе эксплуатации. Экспериментально-теоретическая методика определения параметров модели (1)–(12) приведена в [1].

Результаты моделирования процесса термоусталости материала 12Х18Н10Т поверхности трубы, имеющей температуру $T = 310^\circ\text{C}$, при падении на нее каплей дистиллята с температурой $T = 20^\circ\text{C}$ и частотой 1 Гц сопоставлены с результатами реализованного в ОАО «НПО ЦКТИ» эксперимента. В процессе эксперимента в локальных зонах падения капель на нагретую поверхность трубы (диаметр 63 мм, толщина стенки 3 мм, рис. 1) ультразвуковым и токовихревым методами контролировались параметры роста зародившихся трещин.

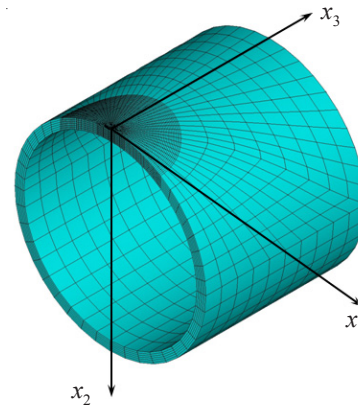


Рис. 1

После наработки $9,3 \cdot 10^6$ термоциклов были изготовлены шлифы и проведены металлографические исследования, в результате которых были выявлены идущие с поверхности трубчатого образца трещины размерами $85 \div 1873$ мкм. Согласно сигналам УЗК, при частоте 1 Гц трещины начинают фиксироваться после $N \approx 1 \cdot 10^6$ циклов падения капель (кривая 1, рис. 2); согласно токовихревому методу – начиная с $N \approx 2 \cdot 10^6$ циклов (кривая 2, рис. 2). На рис. 2 M – уровень отраженного сигнала.

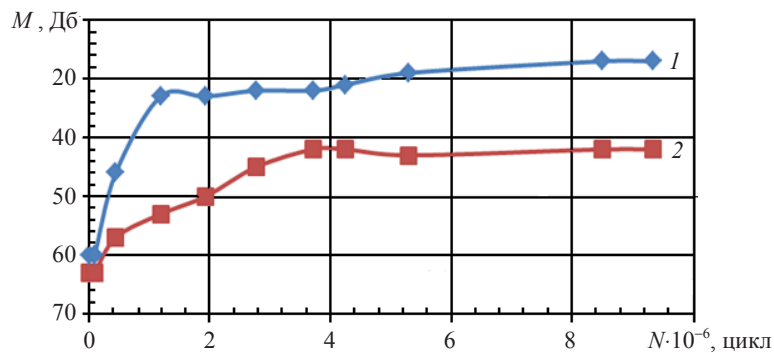


Рис. 2

Расчет процесса термопульсаций проводился в два этапа. На первом этапе моделировался процесс разогрева трубы до температуры $\sim 310^\circ\text{C}$ и подъема внутрен-

него давления до ~ 10 МПа, а затем моделировался процесс падения с частотой 1 Гц капле дистиллята с температурой $T = 20$ °С на наружную поверхность трубы, нагретую до $T = 310$ °С. Для центральной части области падения капле по результатам трехмерных расчетов для нескольких начальных циклов определялись истории изменения температуры T (рис. 3) и компонент тензора полных деформаций e_{ij} (рис. 4).

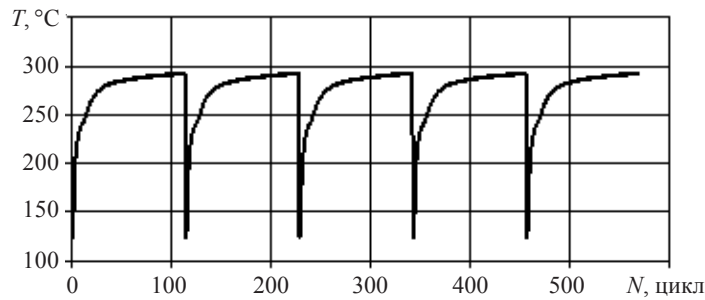


Рис. 3

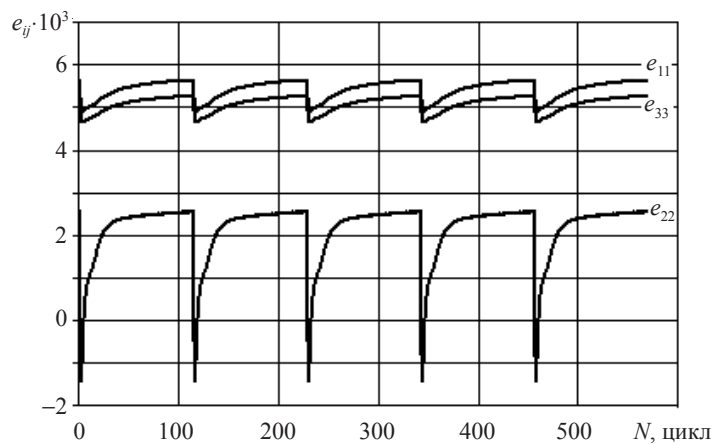


Рис. 4

На втором этапе полученная история изменения температуры T и компонент тензора полных деформаций e_{ij} принималась в качестве исходных данных для расчета по программе «Ресурс-НН» процесса неизоотермического упругопластического деформирования и накопления термоусталостных повреждений до зарождения трещины в материале зоны пятна ($W_p \approx W_{pf}$, $\omega_p \approx 1$). Путем интегрирования эволюционных уравнений (1)–(12) рассчитывались параметры процессов упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в заданных зонах конструктивных элементов при термомеханических воздействиях.

Практическая точность расчетов кинетики напряженного состояния в конструкционных материалах по заданной истории изменения деформаций и температуры, подтвержденная при верификации ПС «Ресурс-НН» [1], составляет порядка 15% (по результатам сопоставления расчетов с экспериментальными результатами при одноосном растяжении-сжатии, при совместном растяжении-сжатии и знакопеременном кручении лабораторных образцов).

Основные параметры модели для материала 12Х18Н10Т приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры математической модели для материала 12X18H10T

№№ п.п.	Параметр	Значения параметра		
Параметры модели термопластичности				
1	Температура, °С	20	150	350
2	Модуль упругости Юнга E , МПа	$2,01 \cdot 10^5$	$1,97 \cdot 10^5$	$1,88 \cdot 10^5$
3	Объемный модуль K , МПа	170833	164167	154167
4	Модуль сдвига G , МПа	78846	75869	71154
5	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^5$	1,66	1,71	1,75
6	Начальный радиус поверхности текучести C_0 , МПа	191,5	168	152
7	Модуль кинематического упрочнения g_1 , МПа	23626,1	14770	9312
8	Модуль кинематического упрочнения g_2	250,72	172	150,2
Параметры модели накопления повреждений				
9	α	0	0	0
10	r	0,3	0,3	0,3
11	W_{pf} , МДж/м ³	8186	8186	8186

На рис. 5 показаны графики изменения компонент тензора напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} , вычисленные по заданной истории изменения температуры T (см. рис. 3) и компонент тензора полных деформаций e_{11} , e_{22} , e_{33} (см. рис. 4) (значения касательных напряжений σ_{12} , σ_{13} , σ_{23} на порядок меньше значений напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{33}).

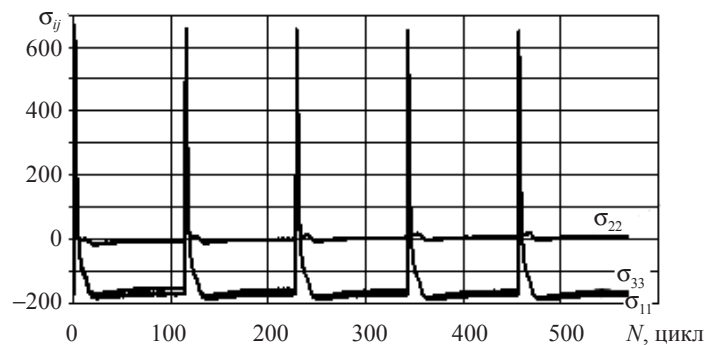


Рис. 5

Из приведенных графиков видно, что при падении холодной капли с температурой $T = 20$ °С на разогретую поверхность трубы (~ 310 °С) наблюдается резкий подъем компонент тензора напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} , напряженное состояние близко к трехосному растяжению. При этом параметр жесткости напряженного состояния $\beta = \sigma / \sigma_u$ ($\sigma = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$, $\sigma_u = (\sigma'_{ij} \sigma'_{ij})^{1/2}$, $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}$) резко возрастает (рис. 6). Затем в результате нагревания зоны падения капля за счет окружающего ее нагретого материала трубы напряжения σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} и параметр β уменьшаются до отрицательных значений. Этот циклический процесс занимает приблизительно сотую долю общей длительности цикла падения капли. До падения следующей капли напряженно-деформированное состояние практически остается неизменным. На рис. 7, 8 приведены графики изменения интенсивности тензора напряжений σ_u и компонент тензора пластических деформаций e_{11}^p , e_{22}^p , e_{33}^p . В результате процесса

пластического деформирования материала происходит накопление повреждений по объему материала в зоне падения капель в соответствии с (10)–(12).

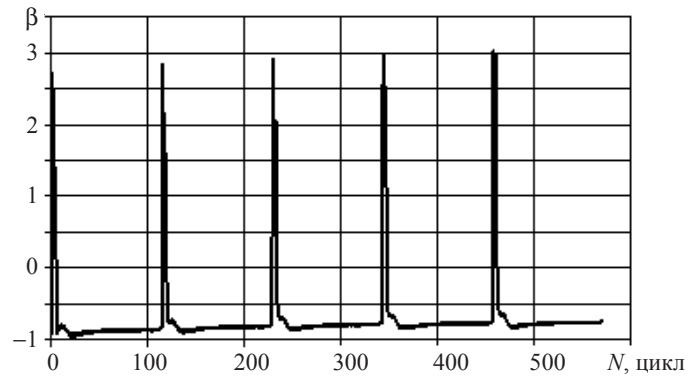


Рис. 6

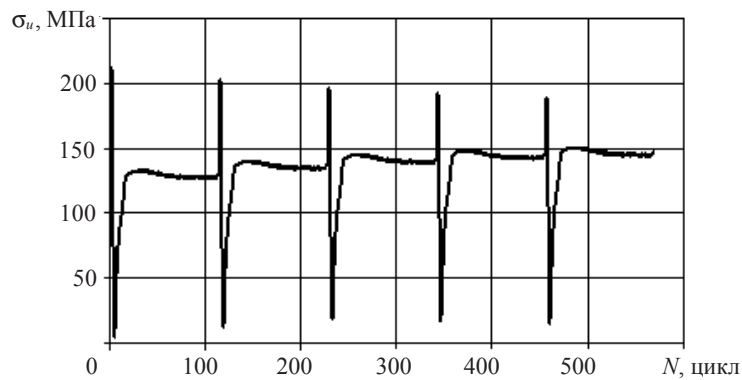


Рис. 7

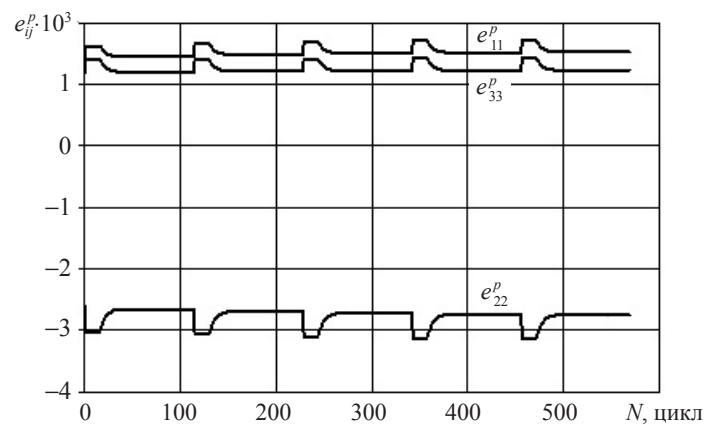


Рис. 8

Расчетная долговечность до зарождения трещины в зоне падения капель с частотой 1 Гц без учета влияния параметра жесткости напряженного состояния β ($\beta = 0, f(\beta) = 1$) составила порядка $3 \cdot 10^6$ циклов падения капель.

В монографиях [2, 3] приведены экспериментальные данные по влиянию наложенного всестороннего растяжения на предельную пластичность (до зарождения

трещины в шейке образца) при одноосном растяжении. Анализ этих данных показывает, что при наложенном всестороннем растяжении ($\beta > 0$) предельная пластичность одноосного растяжения уменьшается в несколько раз. Для учета влияния трехосного растяжения на долговечность материала до зарождения трещины при термопульсациях проводился расчет долговечности с учетом влияния функции $f(\beta)$ согласно (12), (13). Коэффициенты a_1 и a_2 в уравнении (13) выбирались из следующих условий. Параметры уравнений (2)–(13) определялись по результатам базового эксперимента [1] и по экспериментальной кривой усталости стали 12X18H10T (одноосное растяжение-сжатие, $\beta = 1/\sqrt{6}$). На рис. 9 сплошной линией показана экспериментальная усталостная кривая материала 12X18H10T при $T = 20^\circ\text{C}$. Стрелкой *A* отмечена амплитуда интенсивности пластических деформаций $\Delta e_u^p = 0,006$ ($\Delta e_u^p = \sqrt{2/3}(\Delta \epsilon_{ij}^p \Delta \epsilon_{ij}^p)$), при которой определялись параметры эволюционных уравнений накопления повреждений (10)–(13).

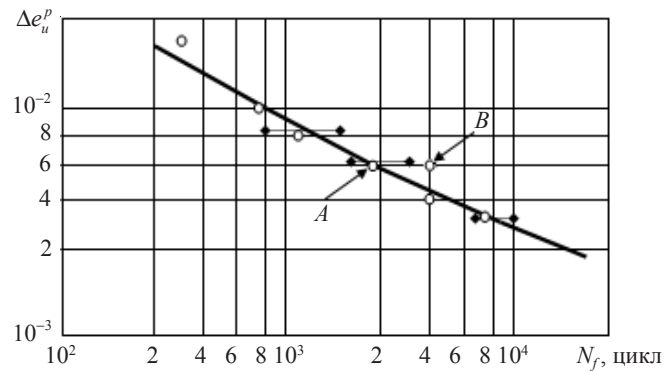


Рис. 9

Параметры a_1 и a_2 в уравнении для $f(\beta)$ в (13) выбирались из условия, что при знакопеременном кручении при той же амплитуде интенсивности пластических деформаций Δe_u^p долговечность (число циклов до зарождения трещины) увеличивается приблизительно вдвое (стрелка *B* на рис. 9). С учетом влияния функции $f(\beta)$ расчетная долговечность до зарождения трещины составила $\sim 1,6 \cdot 10^6$ циклов падения капель. Кривая накопления усталостных повреждений для этого случая показана на рис. 10.

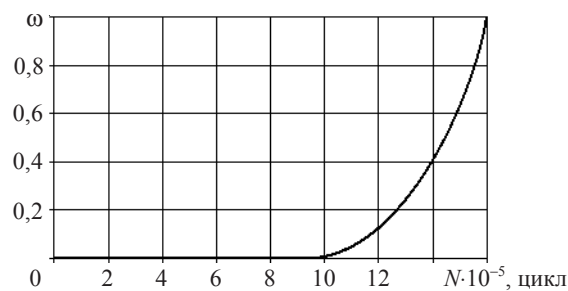


Рис. 10

Анализ процесса деформирования материала показывает, что при частоте 1 Гц процесс деформирования имеет ярко выраженный нестационарный упругопластический характер: при падении холодной капли на горячую поверхность наблюдается резкий «всплеск» компонент нормальных напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} , носящий, в

основном, гидростатический характер (растяжение, см. рис. 5, 6), при котором гидростатическая положительная составляющая тензора напряжений σ за доли секунды достигает значительной величины. По мере нагревания пятна напряжения стремятся к нулю, а затем принимают отрицательные значения за счет начального пластического растяжения материала пятна при падении капли. На рис. 11–13 показаны соответственно петли гистерезиса $\sigma_{11} \sim e_{11}^p$, $\sigma_{22} \sim e_{22}^p$, $\sigma_{33} \sim e_{33}^p$, иллюстрирующие выраженный сложный характер процесса упругопластического деформирования материала. Расчетное количество падений капель (циклов нагружения) до зарождения макротрещины в металле пятна без учета влияния гидростатического растяжения ($f(\beta) = 1$) составляет $\sim 3 \cdot 10^6$ циклов. Если учесть, что при одноосном растяжении-сжатии для стали 12Х18Н10Т при $T = 20^\circ\text{C}$ долговечность описывается усталостной кривой (амплитуда интенсивности пластических деформаций $e_u^p \sim$ число циклов до разрушения N), приведенной на рис. 10 [1, 2], то параметры функции $f(\beta)$ должны иметь значения $a_1 \cong 0$, $a_2 \cong 2,5$. С учетом влияния β из (12) следует, что усталостная долговечность материала при термопульсациях составляет $\sim 1,6 \cdot 10^6$ циклов.

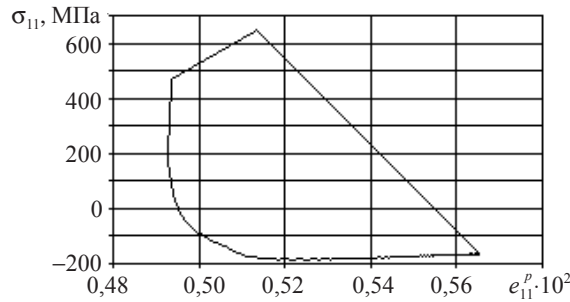


Рис. 11

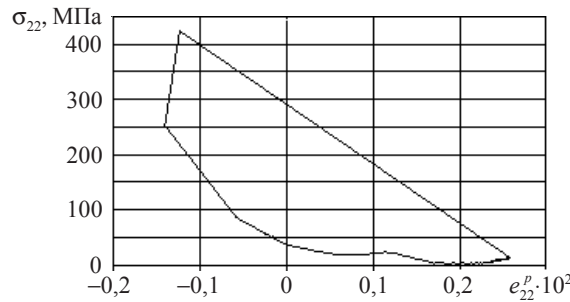


Рис. 12

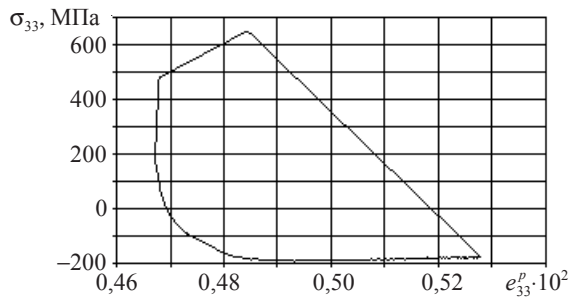


Рис. 13

Ультразвуковой и токовихревой методы неразрушающего обнаружения растущих трещин в зоне падения капель (см. рис. 2) по площади их отражательной способности фиксируют начало зарождения трещин и их уверенную фиксацию в диапазоне $\sim 1 \cdot 10^6 \div 3 \cdot 10^6$ циклов падения капель. Таким образом, расчетные оценки количества циклов до зарождения трещин в зоне падения капель достаточно хорошо коррелируют с экспериментальными результатами.

Список литературы

1. Методы обоснования ресурса ЯЭУ / Ф.М. Митенков, В.Б. Кайдалов, Ю.Г. Коротких, В.А. Панов, С.Н. Пичков. М.: Машиностроение, 2007. 445 с.
2. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит, 2008. 422 с.
3. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Л.: Машиноведение, 1978. 397 с.
4. Программная реализация моделирования процессов упругопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах / В.В. Банкрутенко, М.А. Большухин, В.В. Киселев, Ю.Г. Коротких, В.А. Панов, В.А. Пахомов // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т, 2013. Вып. 75 (3). С. 238–244.
5. Аттестационный паспорт программного средства «Ресурс-НН» №323 от 18.04.2013 г.

**MODELING DAMAGE ACCUMULATION PROCESSES RESULTING
FROM THERMAL PULSATION**

**M.A. Bolshukhin, V.V. Lebedev, A.V. Kozin, Yu.G. Korotkikh,
V.A. Panov, V.A. Pakhomov**

Equations of mechanics of damaged media are presented for modeling the processes of elastoplastic non-isothermal deformation and damage accumulation in structural materials under thermal-mechanical loading. The computational results for damage accumulation processes under thermal pulsation are compared against experimental results.

Keywords: thermal-mechanical loading, thermal pulsations, mathematical models, elastoplastic deformation, damage.