

УДК 539.3

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТАЛИ 08X18N10T  
ПРИ РЕГУЛЯРНОМ И БЛОЧНЫХ  
ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ\***

© 2014 г.

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

<sup>1</sup>ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

<sup>2</sup>Волжская государственная академия водного транспорта,  
Нижний Новгород

pmpmvgavt@yandex.ru

*Поступила в редакцию 02.12.2013*

Представлены результаты экспериментально-теоретических исследований усталостной долговечности стали аустенитного класса 08X18N10T при регулярном и блочных циклических режимах малоциклового нагружения. С позиции механики поврежденной среды моделируются процессы накопления усталостных повреждений при малоцикловой усталости. Проведена верификация предложенной модели оценки усталостной долговечности конструкционных сталей путем сравнения результатов численного моделирования процессов деформирования и разрушения лабораторных образцов с опытными данными. Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных позволяют сделать вывод о достоверности определяющих соотношений механики поврежденной среды и используемой методики определения материальных параметров при действии механизма малоцикловой усталости. Отмечены некоторые характерные особенности, сопровождающие процесс усталостного разрушения при блочных режимах малоциклового нагружения.

*Ключевые слова:* напряженно-деформированное состояние, пластичность, усталость, разрушение, накопление повреждений, число циклов до разрушения, долговечность, ресурс.

### **Введение**

В течение длительного срока службы материал конструктивных элементов оборудования и систем инженерных объектов, работающих в условиях нестационарного термосилового нагружения, накапливает усталостные повреждения, приводящие к ухудшению начальных прочностных характеристик, образованию и развитию дефектов. Для обеспечения гарантированной безопасной эксплуатации таких объектов необходимо контролировать темпы развития поврежденности в наиболее

---

\* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант 12-08-00204-а).

опасных зонах конструктивных элементов, а также прогнозировать развитие этих процессов до предельных состояний.

Сложность решения этой проблемы определяется сложностью процессов, происходящих в конструкционных материалах в эксплуатационных условиях. Адекватная математическая модель, содержащая конкретные параметры кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС), определяющиеся условиями эксплуатации объекта, может стать теоретической основой для разработки методик и алгоритмов оценки ресурса ответственных инженерных объектов в зависимости от индивидуальной истории их эксплуатации [1].

В настоящей статье представлены результаты экспериментально-теоретических исследований усталостной долговечности нержавеющей стали аустенитного класса 08X18H10T при регулярном и блочных циклических режимах малоциклового нагружения. Путем сравнения опытных данных с результатами численного моделирования процессов деформирования и разрушения лабораторных образцов показана достоверность определяющих соотношений механики поврежденной среды (МПС), развитых в работах [1, 2], при регулярном и блочных режимах малоциклового нагружения. Исследована возможность использования правила линейного суммирования повреждений Пальмгрена – Майнера при блочном малоцикловом нагружении.

#### **Экспериментальные исследования накопления усталостных повреждений при малоцикловом нагружении**

Экспериментальные исследования проводились на универсальной испытательной машине МИУ-200.1КТ (предприятие-изготовитель НИКЦИМ «Точмашприбор», г. Армавир). Лабораторные образцы для испытаний (рис. 1) изготавливались из стали аустенитного класса 08X18H10T одной партии и плавки. Форма образца обеспечивает однородное распределение полей деформаций, напряжений в его рабочей части.

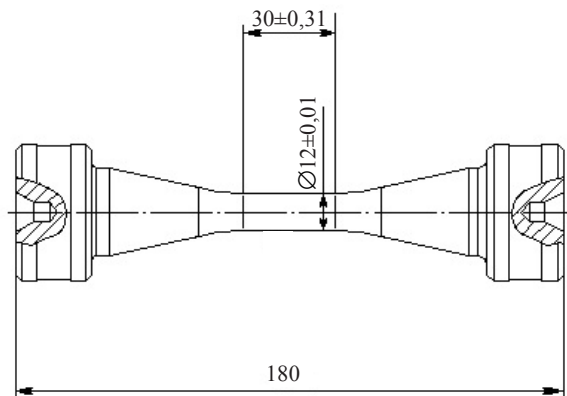


Рис. 1

Эксперименты проводились по схеме «жесткого нагружения» при симметричном циклическом растяжении-сжатии лабораторных образцов на базе 30 мм (см. рис. 1). Измерение деформаций осуществлялось с помощью индуктивного деформометра непосредственно на рабочей части образца. Принципиальная схема измерения деформации на лабораторном образце приведена на рис. 2.

- 1 – индуктивный деформометр;
- 2 – лабораторный образец;
- 3 – распашная термокамера\*;
- 4 – тяги высокотемпературных захватов\*;
- 5 – кольца охлаждения высокотемпературных захватов\*;
- 6 – керамические щупы деформометра;
- 7 – термопары\*.

\* для испытаний при повышенных температурах

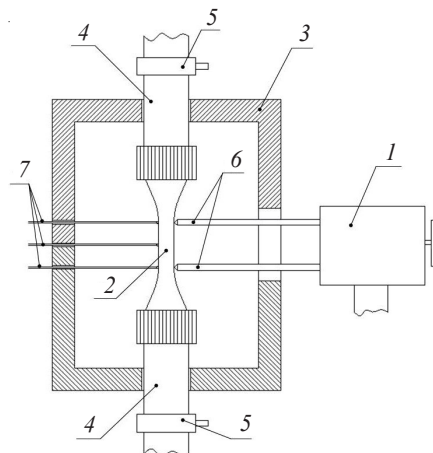


Рис. 2

Применение индуктивного деформометра обусловлено тем, что его керамические щупы не приводят к повреждению рабочей части образца в отличие от ножевых деформометров, использование которых может привести к образованию рисок (концентраторов напряжений) в месте установки ножей и, как следствие, к получению недостоверной информации по ресурсным характеристикам конструкционных сталей при малоциклового усталости (МЦУ).

При проведении испытаний выполнялись следующие условия:

- скорость деформирования составляла  $5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  и исключала саморазогрев лабораторных образцов более чем на  $30^\circ\text{C}$ . Испытания проводились при одной скорости деформирования и температуре  $20^\circ\text{C}$  для всех образцов;
- результаты испытаний исключались из дальнейшего рассмотрения при разрушении образца за пределами его рабочей части;
- испытания проводились до образования макротрещины длиной  $\sim 2\div 3 \text{ мм}$ .

Экспериментальные исследования состояли из следующих видов испытаний.

1. Испытания на малоцикловую усталость в диапазоне от  $10^2$  до  $10^4$  циклов для трех уровней амплитуд пластических деформаций: 0,2%, 0,4% и 0,6%. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1

Амплитуда пластической деформации $e_{11}^P$ , %	Число циклов до разрушения $N_f$
0,2	1450–2150
0,4	550–710
0,6	310–375

2. Испытания на малоцикловую усталость в условиях контролируемой знакопеременной осевой деформации с использованием двух и трех значений амплитуд пластической деформации (блочное нагружение), изменяющихся как при увеличивающихся, так и при уменьшающихся амплитудах напряжений от блока к блоку.

Испытания проведены для следующих режимов нагружения:

- циклическое нагружение с амплитудой  $e_{11}^P = 0,2\%$  (блок 1) до  $N = 1400$  циклов, циклическое нагружение с амплитудой  $e_{11}^P = 0,6\%$  (блок 2) до образования макротрещины (рис. 3а);

– циклическое нагружение с амплитудой  $e_{11}^P = 0,2\%$  (блок 1) до  $N = 1400$  циклов, циклическое нагружение с амплитудой  $e_{11}^P = 0,4\%$  (блок 2) до образования макротрещины (рис. 3б);

– циклическое нагружение с амплитудой  $e_{11}^P = 0,6\%$  (блок 1) до  $N = 130$  циклов, циклическое нагружение с амплитудой  $e_{11}^P = 0,2\%$  (блок 2) до образования макротрещины (рис. 3в);

– циклическое нагружение с амплитудой  $e_{11}^P = 0,6\%$  (блок 1) до  $N = 100$  циклов, циклическое нагружение с амплитудой  $e_{11}^P = 0,4\%$  (блок 2) до  $N = 100$  циклов, циклическое нагружение с амплитудой  $e_{11}^P = 0,2\%$  (блок 3) до образования макротрещины (рис. 3г).

На рис. 3 по оси  $N$  отложены значения отработанных циклов нагружения в каждом блоке (в последних блоках нагружения приведен экспериментальный разброс числа циклов, полученный при испытаниях нескольких образцов).

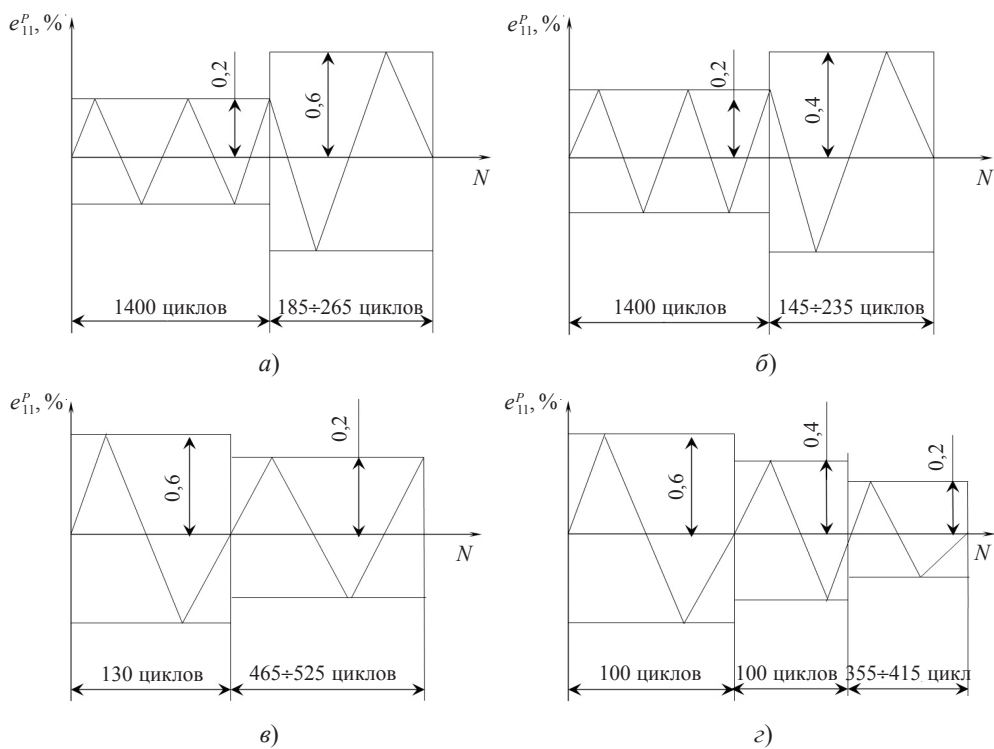


Рис. 3

### Определяющие соотношения механики поврежденной среды

Модель поврежденной среды состоит из трех взаимосвязанных составных частей [1–3]:

- соотношений, определяющих упругопластическое поведение материала с учетом зависимости от процесса разрушения;
- уравнений, описывающих кинетику накопления повреждений;
- критерия прочности поврежденного материала.

Определяющие соотношения термопластичности базируются на следующих основных положениях:

– тензоры деформаций  $e_{ij}$  и скоростей деформаций  $\dot{e}_{ij}$  включают в себя упругие  $e_{ij}^e, \dot{e}_{ij}^e$  и пластические  $e_{ij}^p, \dot{e}_{ij}^p$  деформации, т.е. обратимые и необратимые составляющие;

– начальная поверхность текучести для различных температур описывается поверхностью в форме Мизеса. Эволюция изменения поверхности текучести описывается изменением ее радиуса  $C_p$  и перемещением ее центра  $\rho_{ij}$ ;

– изменение объема тела происходит упруго;

– рассматриваются начально изотропные среды. Учитывается только анизотропия, вызванная процессами пластичности.

При формулировке определяющих соотношений тензоры напряжений  $\sigma_{ij}$  и деформаций  $e_{ij}$  и их приращения представляются в виде шаровых  $\sigma, \Delta\sigma, e, \Delta e$  и девиаторных  $\sigma'_{ij}, \Delta\sigma'_{ij}, e'_{ij}, \Delta e'_{ij}$  составляющих:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij} &= \sigma'_{ij} + \sigma\delta_{ij}, & \Delta\sigma_{ij} &= \Delta\sigma'_{ij} + \Delta\sigma\delta_{ij}, & \sigma &= \sigma_{ii}/3, \\ e_{ij} &= e'_{ij} + e\delta_{ij}, & \Delta e_{ij} &= \Delta e'_{ij} + \Delta e\delta_{ij}, & e &= e_{ii}/3,\end{aligned}$$

где  $\delta_{ij}$  – тензор Кронекера.

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

$$\begin{aligned}\sigma &= 3K[e - \alpha(T - T_0)], & \sigma'_{ij} &= 2Ge_{ij}^{te}, \\ \dot{\sigma} &= 3K[\dot{e} - (\dot{\alpha}T)] + \frac{K\sigma}{K}, & \dot{\sigma}'_{ij} &= 2G\dot{e}_{ij}^{te} + \frac{\dot{G}\sigma'_{ij}}{G},\end{aligned}\quad (1)$$

где  $T$  – температура,  $T_0$  – начальная температура,  $K$  – модуль объемного сжатия,  $G$  – модуль сдвига,  $\alpha$  – коэффициент линейного температурного расширения материала.

Для описания эффектов монотонного и циклического деформирования в пространстве напряжений вводится поверхность текучести, уравнение которой имеет вид:

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

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:

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

где  $\rho_{\max}$  – максимальный за историю нагружения модуль  $\rho_{ij}$ .

Эволюционное уравнение для радиуса поверхности текучести имеет вид [1–3]:

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

$$C_p = C_p^0 + \int_0^t \dot{C}_p dt, \quad \dot{\chi} = \left( \frac{2}{3} \dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \right)^{1/2}, \quad (5)$$

$$\chi_m = \int_0^t \dot{\chi} H(F_p) dt, \quad \chi = \int_0^t \dot{\chi} dt,$$

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

$$A = 1 - \cos^2 \theta, \quad \cos \theta = n_{ij}^e n_{ij}^s,$$

$$n_{ij}^e = \frac{\dot{\epsilon}'_{ij}}{(\dot{\epsilon}'_{ij} \dot{\epsilon}'_{ij})^{1/2}}, \quad n_{ij}^s = \frac{S_{ij}}{(S_{ij} S_{ij})^{1/2}},$$

$$H(F_\rho) = \begin{cases} 1, & F_\rho = 0 \wedge \rho_{ij} \dot{\rho}_{ij} > 0 \\ 0, & F_\rho < 0 \vee \rho_{ij} \dot{\rho}_{ij} \leq 0 \end{cases}, \quad \Gamma(F_\rho) = 1 - H(F_\rho). \quad (6)$$

Здесь  $q_1, q_2, q_3$  – модули изотропного упрочнения;  $Q_1$  и  $Q_2$  – модули циклического изотропного упрочнения;  $a$  – постоянная, определяющая скорость процесса стационарирования петли гистерезиса циклического деформирования материала;  $Q_s$  – стационарное значение радиуса поверхности текучести при данных  $\rho_{\max}$  и  $T$ ;  $C_p^0$  – 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).

Эволюция перемещения центра поверхности текучести  $\rho_{ij}$ , описывающей анизотропию упрочнения пластического деформирования, имеет вид:

$$\dot{\rho}_{ij} = g_1 \dot{\epsilon}_{ij}^p - g_2 \rho_{ij} \dot{\chi} - g_3 \rho_{ij} \dot{T}, \quad \rho_{ij} = \int_0^t \dot{\rho}_{ij} dt, \quad (7)$$

где  $g_1 > 0$ ,  $g_2 > 0$  и  $g_3 > 0$  – модули анизотропного упрочнения.

Для описания эволюции поверхности «памяти» используется эволюционное уравнение для  $\rho_{\max}$ :

$$\dot{\rho}_{\max} = \frac{(\rho_{ij} \dot{\rho}_{ij}) H(F_\rho)}{(\rho_{mn} \rho_{mn})^{1/2}} - g_2 \rho_{\max} \dot{\chi} - g_3 \rho_{\max} \dot{T}. \quad (8)$$

Второй член в (8) описывает эффект затухания «памяти» о предыдущем циклическом деформировании материала.

Соотношения (3) и (6) позволяют автоматически отделить циклическое нагружение от монотонного с помощью операторов  $H(F_\rho)$  и  $\Gamma(F_\rho)$ .

Эволюционное уравнение накопления повреждений при малоциклового усталости имеет вид:

$$\dot{\omega} = \frac{\alpha + 1}{r + 1} f(\beta) Z^\alpha (1 - \omega)^{-r} \langle \dot{Z} \rangle, \quad (9)$$

$$Z = \frac{W - W_a}{W_f - W_a}, \quad \langle \dot{Z} \rangle = \begin{cases} \dot{Z} & \text{при } \dot{Z} > 0, \\ 0 & \text{при } \dot{Z} \leq 0, \end{cases} \quad (10)$$

$$\langle \dot{Z} \rangle = \frac{\langle \dot{W} \rangle}{W_f - W_a}, \quad \dot{W} = \rho_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p, \quad (11)$$

$$f(\beta) = \exp(-k\beta), \quad (12)$$

где  $\alpha, r, k$  – материальные параметры, зависящие от температуры  $T$ ;  $f(\beta)$  – функция параметра объемности напряженного состояния  $\beta = \sigma/\sigma_u$ ;  $W = \int_0^t \dot{W} dt$  – энергия, идущая на образование рассеянных усталостных повреждений при МЦУ;  $W_a$  – значение энергии в конце фазы зарождения микродефектов при МЦУ;  $W_f$  – значение энергии, соответствующей образованию трещины.

Интегрируя уравнение (9) для некоторого заданного процесса нагружения и изменения температуры  $T$ , получим:

$$\omega = 1 - [1 - Y^{\alpha+1}]^{1/(r+1)}, \quad (13)$$

$$Y = AZ, \quad A = \left[ \frac{(\alpha+1) \int_0^Z f(\beta) Z^\alpha dZ}{Z^{(\alpha+1)}} \right]^{1/(\alpha+1)}. \quad (14)$$

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

$$\omega = \omega_f \leq 1. \quad (15)$$

Функциональные зависимости для материальных параметров  $q_1, q_2, q_3, Q_1, Q_2, g_1, g_2, g_3, a, \alpha, r, W_f, W_a$  определялись из базовых экспериментов по методике, приведенной в [4, 5]. Материальные параметры уравнений определяющих соотношений механики поврежденной среды для стали аустенитного класса 08X18H10T при температуре 20 °С приведены в [1, 2].

### Сравнение численных результатов с экспериментальными данными

Проведена оценка достоверности вышеописанных определяющих соотношений механики поврежденной среды при регулярном и блочном режимах малоциклового нагружения, заключающаяся в сравнении результатов численного моделирования кинетики напряженно-деформированного состояния и накопления усталостных повреждений лабораторных образцов с результатами экспериментов при аналогичных режимах нагружения.

На рис. 4, 5 представлены зависимости максимальных значений напряжений в цикле от количества циклов  $N$ . Маркерами отмечены данные, полученные в ходе проведения испытаний для трех лабораторных образцов. Видно качественное и количественное совпадение опытных и расчетных данных.

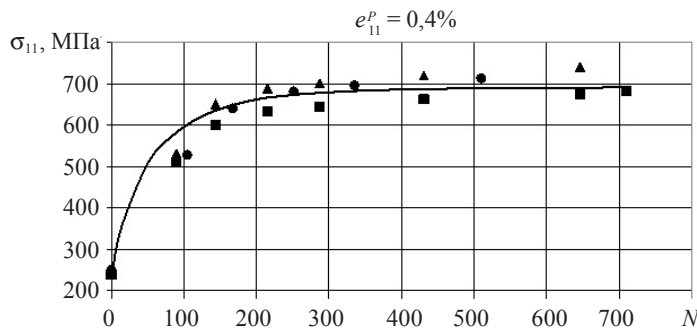


Рис. 4

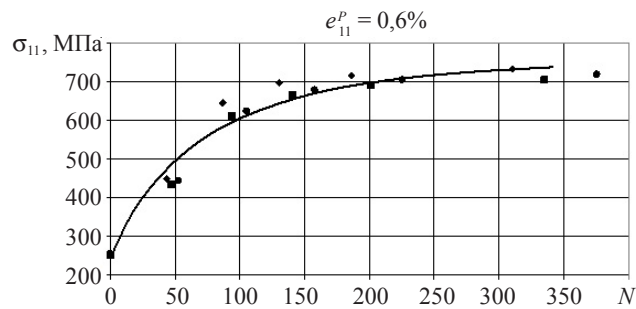


Рис. 5

На рис. 6, 7 представлены типовые кривые расчетных (черная кривая) и экспериментальных петель (красная кривая) гистерезиса на первых циклах нагружения.

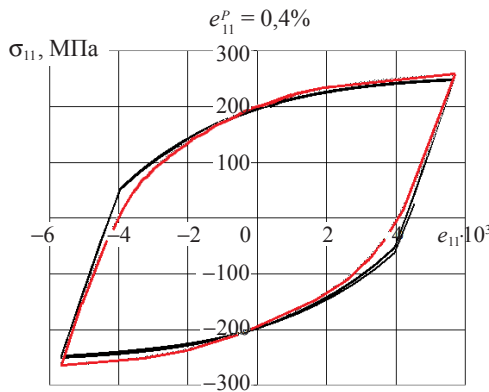


Рис. 6

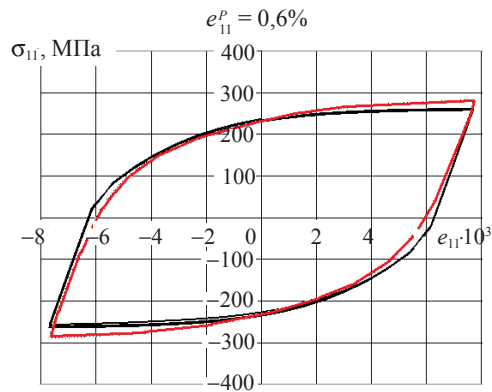


Рис. 7

Сравнение расчетного и опытного числа циклов до образования макротрещины при регулярном и блочном циклическом нагружении приведено в таблице 2 (в последнем столбце табл. 2 приведено значение величины поврежденности  $\omega$ , полученное с использованием гипотезы линейного суммирования повреждений Пальмгрена – Майнера). На рис. 8 приведена экспериментальная кривая МЦУ стали 08X18Н10Т с нанесенными на нее расчетными данными. Видно качественное и количественное совпадение опытных и расчетных данных.

Таблица 2

Блок №1	Блок №2	Блок №3	Экспер. число циклов до разрушения	Расчет. число циклов до разрушения	$\omega = \sum N_i / N_{fi}$
1	2	3	4	5	6
$e_{11}^p = 0,2\%$ до образования макротрещины	–	–	1667	1930	1
$e_{11}^p = 0,4\%$ до образования макротрещины	–	–	590	494	1



Таблица 2 (продолжение)

1	2	3	4	5	6
$e_{11}^p = 0,6\%$ до образования макротрещины	–	–	312	263	1
$e_{11}^p = 0,2\%$ $N = 1400$ циклов	$e_{11}^p = 0,6\%$ до образования макротрещины	–	1625	1644	1,56
$e_{11}^p = 0,2\%$ $N = 1400$ циклов	$e_{11}^p = 0,4\%$ до образования макротрещины	–	1590	1602	1,11
$e_{11}^p = 0,6\%$ $N = 130$ циклов	$e_{11}^p = 0,2\%$ до образования макротрещины	–	625	643	0,77
$e_{11}^p = 0,6\%$ $N = 100$ циклов	$e_{11}^p = 0,4\%$ $N = 100$ циклов	$e_{11}^p = 0,2\%$ до образования макротрещины	585	605	0,78

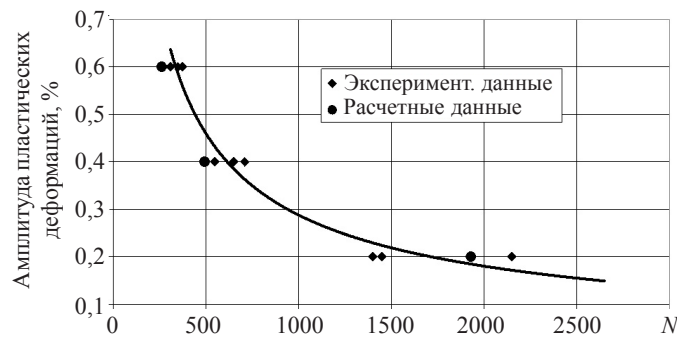


Рис. 8

На рис. 9 приведены графики накопления величины поврежденности материала  $\omega$  в зависимости от амплитуды пластических деформаций  $e_{11}^p$  при регулярных режимах малоциклового нагружения.

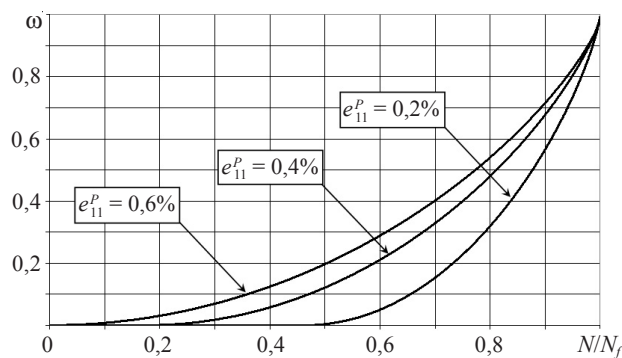


Рис. 9

На рис. 10–13 представлены зависимости величины поврежденности  $\omega$  от относительного числа циклов нагружения при блочных режимах малоциклового нагружения. Схемы нагружения представлены на рис. 3а–г.

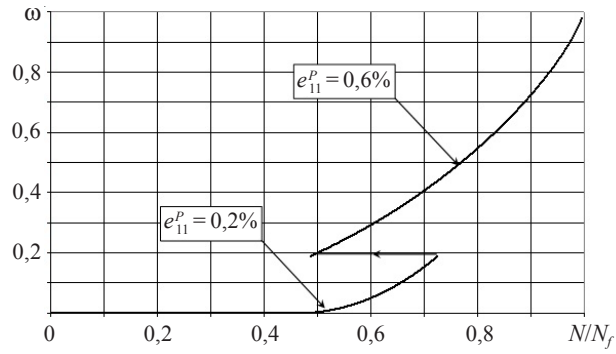


Рис. 10

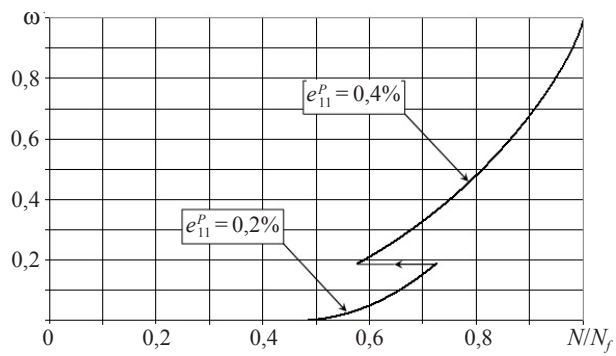


Рис. 11

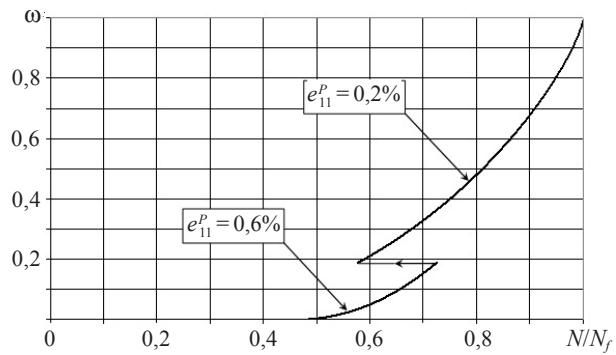


Рис. 12

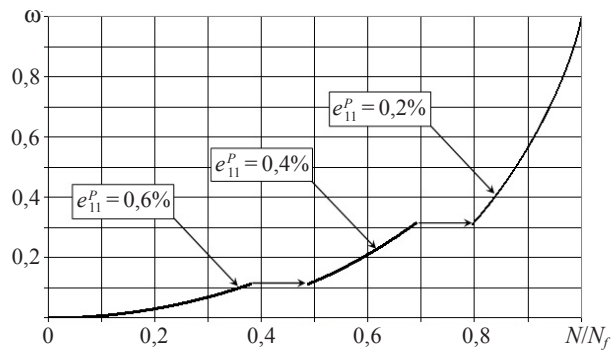


Рис. 13

В условиях двухблочного циклического нагружения по первому режиму (см. рис. 3а) при переходе от амплитуды  $e_{11}^P = 0,2\%$  к амплитуде  $e_{11}^P = 0,6\%$  число циклов равно  $N_1 = 1400$  и при  $\omega \approx 0,2$  наблюдается переход с одной кривой на другую. Суммарное количество циклов до разрушения ( $\omega_f = 1$ ) равно  $N_f \cong 1625$ .

Согласно правилу линейного суммирования повреждений имеем:

$$\sum \frac{N_i}{N_{fi}} = \frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} = \frac{1400}{1667} + \frac{N_2}{312} = 1, \quad (16)$$

следовательно,  $N_2 \approx 50$ .

Но из табл. 2 следует, что  $N_2 \cong 225$  ( $N_2 = N_f - N_1$ ). Подстановка этого значения  $N_2$  в выражение (16) приводит к неравенству:

$$\sum \frac{N_i}{N_{fi}} = \frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} \approx 1,56 > 1.$$

Сравнение полученного значения с экспериментальными данными показывает, что гипотеза линейного суммирования повреждений Пальмгрена – Майнера дает ошибку в консервативную сторону при переходе с меньшей амплитуды нагружения на большую. Аналогичный результат получаем и для двухблочного циклического нагружения по второму режиму (см. рис. 3б) при переходе от амплитуды  $e_{11}^P = 0,2\%$  к амплитуде  $e_{11}^P = 0,4\%$  (см. табл. 2).

В условиях двухблочного циклического нагружения по третьему режиму (см. рис. 3в) при переходе от амплитуды  $e_{11}^P = 0,6\%$  к амплитуде  $e_{11}^P = 0,2\%$  число циклов равно  $N_1 = 130$  и при  $\omega \approx 0,2$  наблюдается переход с одной кривой на другую. Суммарное количество циклов до разрушения ( $\omega_f = 1$ ) равно  $N_f \cong 625$ .

Согласно правилу линейного суммирования повреждений имеем

$$\sum \frac{N_i}{N_{fi}} = \frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} = \frac{130}{312} + \frac{N_2}{1400} = 1, \quad (17)$$

следовательно,  $N_2 \approx 816$ .

Но из табл. 2 следует, что  $N_2 \cong 495$  ( $N_2 = N_f - N_1$ ). Подстановка этого значения  $N_2$  в выражение (17) приводит к неравенству:

$$\sum \frac{N_i}{N_{fi}} = \frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} \approx 0,77 < 1.$$

Сравнение полученного значения с экспериментальными данными показывает, что гипотеза линейного суммирования повреждений Пальмгрена – Майнера дает ошибку в неконсервативную сторону при переходе с большей амплитуды нагружения на меньшую. Аналогичный результат получается и для трехблочного циклического нагружения по четвертому режиму (см. рис. 3г).

Результаты сравнения экспериментальных данных и результатов численного моделирования при блочных режимах малоциклового нагружения подтверждают адекватность определяющих соотношений модели поврежденной среды при малоциклового усталости (1)–(15). Полученные значения долговечности лабораторных образцов при численном моделировании и фактические значения материальных параметров для данной конструкционной стали 08X18N10T позволяют с большой степенью точности прогнозировать разрушение (образование макротрещины) при блочных режимах малоциклового нагружения. Необходимо отметить (см. табл. 2), что подход, основанный на правиле линейного суммирования повреждений Пальм-

грена – Майнера, может приводить как к консервативной (режим на рис. 3а,б), так и к неконсервативной оценке (режим на рис. 3в,г) долговечности, что подтверждается экспериментальными и теоретическими исследованиями зарубежных и отечественных авторов [4, 6, 7].

### **Заключение**

Проведены экспериментальные исследования усталостной долговечности стали 08X18H10T при регулярных и блочных режимах малоциклового нагружения. Путем сравнения опытных и расчетных данных показано, что модель поврежденной среды [1, 2] позволяет учесть:

- наличие двух стадий накопления усталостных повреждений,
- нелинейность процесса накопления усталостных повреждений,
- нелинейность суммирования повреждений при изменении режимов нагружения.

Исследована возможность использования правила линейного суммирования повреждений Пальмгрена – Майнера для оценки усталостной долговечности при регулярных и блочных режимах малоциклового нагружения. Показано, что данный подход может приводить как к консервативной (при переходе с меньшей амплитуды на большую), так и к неконсервативной (при переходе с большей амплитуды на меньшую) оценке усталостной долговечности материалов и конструкций.

### *Список литературы*

1. Митенков Ф.М., Коротких Ю.Г., Кайдалов В.Б. Методология, методы и средства управления ресурсом ядерных энергетических установок. М.: Машиностроение, 2006. 596 с.
2. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
3. Моделирование основных закономерностей процесса деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах на базе механики поврежденной среды / Д.Н. Шишулин, И.А. Волков, Д.А. Казаков, С.Н. Пичков // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2012. Вып. 74. С. 16–27.
4. *Chaboche J.L.* Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity // *Inter. J. of Plasticity*. 1989. Vol. 5, No 3. P. 247–302.
5. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Шишулин Д.Н. Принципы и методы определения скалярных материальных параметров теории пластического течения с кинематическим и изотропным упрочнением // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2010. Т. 3, №3. С. 46–57.
6. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Тарасов И.С. Численное моделирование накопления повреждений при сложном пластическом деформировании // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2009. Т. 2. С. 5–18.
7. *Бернард-Конноли М., Бью-Куок Т., Бирон А.* Усталость коррозионной стали 304 при испытаниях в условиях многоступенчатой контролируемой деформации // *Труды Америк. общ. инж.-мех. Сер. Д. Теорет. основы инж. расчетов*. 1983. Т. 105, №3. С. 47–53.

**THE EXPERIMENTAL-THEORETICAL STUDY OF THE FATIGUE LIFE  
OF THE 08X18H10T STEEL UNDER REGULAR AND BLOCK CYCLIC LOADING  
OF MECHANICS OF DAMAGED MEDIA**

**D.N. Shishulin, Yu.G. Korotkikh, I.A. Volkov, A.I. Volkov**

The results of the experimentally and theoretically studying the fatigue life of the 08X18H10T austenitic steel under regular and block cyclic modes of low-cycle loading are presented. In the frame of damaged medium mechanics, processes of fatigue damage accumulation for low-cycle fatigue are modeled. The presented model of the methodology for evaluating fatigue life of structural steels has been verified by comparing the results of numerically modeling deformation and failure processes in laboratory specimens with experimental data. The comparison of computational and experimental data makes it possible to corroborate the adequacy of the determining relations of damaged medium mechanics and the methodology for determining material parameters under the effect of the low-cycle fatigue mechanism. A number of characteristic features accompanying the fatigue failure process under block modes of low-cycle loading are noted.

*Keywords:* stressed-strained state, plasticity, fatigue, failure, damage accumulation, number of cycles to failure, fatigue life, resource.