

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СОВМЕСТНЫХ ПРОЦЕССАХ МАЛОЦИКЛОВОЙ И МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Десятникова Мария Александровна (madesyatnikova@vniief.ru)

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Статья посвящена обоснованию возможности корректного численного моделирования процессов деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах при совместном действии малоциклового и многоциклового усталости с помощью разработанной во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» программы «Resource».

Ключевые слова: малоцикловая усталость, многоцикловая усталость, программа «Resource», разрушение, математическая модель.

NUMERICAL INVESTIGATION OF FRACTURE OF STRUCTURAL MATERIALS UNDER COMBINED PROCESSES OF LOW-CYCLE AND HIGH-CYCLE FATIGUE

Desyatnikova Mariya Aleksandrovna (madesyatnikova@vniief.ru)

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The paper is devoted to the substantiation of the possibility to perform correct numerical simulation of the strain and damage accumulation processes in structural materials under the combined action of low-cycle and high-cycle fatigue by the «Resource» code developed at FSUE «RFNC-VNIIEF».

Key words: low-cycle fatigue, high-cycle fatigue, «Resource» code, destruction, mathematical model.

Введение

Одной из задач современных отраслей промышленности является обоснование ресурса оборудования и систем инженерных объектов на стадии их проектирования, оценка выработанного и прогноз остаточного ресурса конструктивных узлов в процессе эксплуатации.

Во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» для обеспечения расчета параметров процесса упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в опасных зонах оборудования (т. е. зон с наибольшими темпами деградиационных процессов) при эксплуатационных квазистатических нерегулярных термомеханических воздействиях была разработана программа для ЭВМ «Resource» [1]. Программа для ЭВМ «Resource» основана на использовании соотношений механики поврежденной среды и фактической модели эксплуатации конструктивного узла.

Данная программа является альтернативной по отношению к нормам расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок [2] и ее использование рассматривается только в качестве дополнения к расчету на циклическую прочность по разделу 5.6 норм [2].

Расчет параметров напряженно-деформированного состояния и процесса накопления повреждений в рамках программы для ЭВМ «Resource» осуществляется в упругопластической постановке путем совместного интегрирования определяющих соотношений неупругого деформирования, основанных на предложениях Ю. Г. Коротких [3], и эволюционных уравнений накопления повреждений для элементарного объема материала опасной зоны конструктивного элемента по заданной истории изменения тензора полных деформаций и температуры (в случае анализа жестких режимов нагружения) или по заданной истории изменения тензора напряжений

и температуры (в случае анализа мягких режимов нагружения).

Модель поврежденной среды

Математическая модель оценки ресурса при деградационных механизмах малоциклового и многоциклового усталости, реализованная в рамках программы «Resource», включает в себя:

- уравнения для описания процессов неупругого деформирования;
- соотношения, моделирующие процесс накопления повреждений;
- критерий разрушения.

Определяющие соотношения термопластичности (уравнения описания процессов неупругого деформирования), основанные на предложениях Ю. Г. Коротких, базируются на следующих основных положениях, приведенных в работах [3–5]:

- материал среды начально изотропен и повреждения в нем отсутствуют, рассматриваются процессы деформирования, характеризующие малыми деформациями;

– девиатор тензора полной деформаций является суммой девиатора тензора упругой деформации e'_{ij} (обратимые), тензора макропластической деформации $e'_{ij}{}^p$ (необратимые), тензора микропластической деформации $e'_{ij}{}^m$ (условно обратимые). Сумма тензоров макропластической и микропластической деформации составляет тензор неупругой деформации $e'_{ij}{}^H$:

$$e'_{ij} = e'_{ij}{}^e + e'_{ij}{}^p + e'_{ij}{}^m = e'_{ij}{}^e + e'_{ij}{}^H, \quad (1)$$

- в пространстве напряжений вводится две поверхности – «макропластического» (поверхность текучести) и «микропластического» нагружения;

– начальная поверхность текучести «макропластического» деформирования для различных температур описывается поверхностью в форме Мизеса. Эволюция поверхности текучести описывается изменением ее радиуса C_p и перемещением ее центра

$\rho_{ij}{}^{pr}$;

- поверхность «микропластического» нагружения также описывается поверхностью в форме Мизеса, имеющей в начальный момент времени общий с поверхностью «макропластического» деформирования центр и радиус C_m .

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

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

$$\dot{\sigma} = 3K[\dot{e} - \dot{\alpha}T - \alpha\dot{T}] + \dot{K}\sigma/K, \quad (3)$$

$$\dot{\sigma}'_{ij} = 2Ge'_{ij}{}^e + \dot{G}e'_{ij}{}^e/G,$$

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

В пространстве девиатора напряжений вводятся поверхности «микропластического нагружения» и текучести:

$$F_m = S_{ij}S_{ij} - C_m^2 = 0, \quad (4)$$

$$S_{ij} = \sigma'_{ij} - \rho_{ij} = \sigma'_{ij} - (\rho_{ij}{}^p + \rho_{ij}{}^r + \rho_{ij}{}^m),$$

$$F_p = S_{ij}^p S_{ij}^p - C_p^2 = 0, \quad (5)$$

$$S_{ij}^p = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}{}^{pr} = \sigma'_{ij} - (\rho_{ij}{}^p + \rho_{ij}{}^r),$$

где C_p – радиус поверхности текучести; C_m – радиус поверхности «микропластического» нагружения; ρ_{ij} – координаты центра поверхности «микропластического» нагружения; $\rho_{ij}{}^{pr}$ – координаты центра поверхности текучести.

Для описания переходных процессов при знакопеременном нагружении в пространстве девиаторов деформаций используется поверхность a_e :

$$a_e = (e_{ij}{}^H - \xi_{ij})(e_{ij}{}^H - \xi_{ij}) - e_{\max}^2 = 0, \quad (6)$$

где e_{\max} – максимальное значение интенсивности тензора неупругих деформаций в процессе нагружения; ξ_{ij} – тензор односторонне накопленных пластических деформаций.

Уравнения для эволюции в процессе нагружения радиусов поверхностей «микропластического» нагружения и текучести имеют вид:

$$\dot{C}_{m,p} = Q^{m,p}\dot{\chi}_n + Q_\xi\dot{\xi} + q_T^{m,p}\dot{T}, \quad (7)$$

$$C_{m,p} = C_{m,p}^0 + \int_0^t \dot{C}_{m,p} dt,$$

$$\chi_n = \left(\frac{2}{3} \dot{e}'_{ij}{}^p \dot{e}'_{ij}{}^p \right)^{1/2}, \quad (8)$$

$$\dot{\xi} = \left(\frac{2}{3} \dot{\xi}_{ij} \dot{\xi}_{ij} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

где $C_{m,p}^0$ – начальное значение радиуса поверхности «микропластического» нагружения и поверхности текучести, $Q^{m,p}$ – модуль изотропного упрочнения; $q_T^{m,p}$ – модуль, характеризующий температурное изменение радиуса поверхности текучести (и по-

верхности «микрoпластического» нагружения); Q_ξ – модуль упрочнения/разупрочнения вследствие перемещения центра поверхности памяти; χ_n – длина траектории неупругого деформирования материала; ξ – смещение центра поверхности памяти.

Внутренняя переменная ρ_{ij} , учитывающая анизотропию упрочнения пластического деформирования, удовлетворяет эволюционному уравнению:

$$\dot{\rho}_{ij} = \dot{\rho}_{ij}^p + \dot{\rho}_{ij}^r + \dot{\rho}_{ij}^m, \quad (10)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^p = f(\chi) \left[g_1 \dot{e}_{ij}^p - g_2 \rho_{ij}^p \dot{\chi}_p \right] + g_T^p \rho_{ij}^p \langle \dot{T} \rangle, \quad (11)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^r = f(\chi) \left\{ g_3 \dot{e}_{ij}^r - g_4 \left[\frac{\rho_{u \min}^r - \rho_u^r}{\rho_u^r} \right] \langle \cos \beta \rangle \rho_{ij}^r \dot{\chi}_p \right\} + g_T^r \rho_{ij}^r \langle \dot{T} \rangle, \quad (12)$$

$$\langle \cos \beta \rangle = \frac{\dot{\rho}_{ij}^p \rho_{ij}^r}{\left(\dot{\rho}_{ij}^p \dot{\rho}_{ij}^p \right)^{1/2} \left(\rho_{ij}^r \rho_{ij}^r \right)^{1/2}}, \quad \rho_u^r = \left(\rho_{ij}^r \rho_{ij}^r \right)^{1/2}, \quad (13)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^m = f(\chi) \left[g_5 \dot{e}_{ij}^m - g_6 \rho_{ij}^m \dot{\chi}_p \right] + g_T^m \rho_{ij}^m \langle \dot{T} \rangle, \quad (14)$$

$$f(\chi) = f(\chi_m) + f(\chi_c) = 1 + k_1 \left(1 - e^{-k_2 \chi_m} \right) + k_3 \left(1 - e^{-k_4 \chi_c} \right), \quad (15)$$

где g_1, g_2 – модули анизотропного упрочнения, характеризующие изменение переменной ρ_{ij} за счет деформационного упрочнения; g_3, g_4 – модули анизотропного упрочнения, характеризующие изменение переменной ρ_{ij} за счет односторонне накапливаемой деформации; g_5, g_6 – модули анизотропного упрочнения, характеризующие изменение переменной ρ_{ij}^m ; k_1, k_2, k_3, k_4 – экспериментально определяемые материальные параметры, характеризующие изменение переменной ρ_{ij} за счет односторонне накапливаемой деформации; g_T^p, g_T^r, g_T^m – модули, характеризующие эволюцию переменной ρ_{ij} за счет изменения температуры.

Компоненты тензора скоростей макропластических e_{ij}^p и микрoпластических e_{ij}^m деформаций подчиняются закону градиентальности:

$$\dot{e}_{ij}^p = \lambda_p S_{ij}, \quad \dot{e}_{ij}^m = \lambda_m S_{ij}, \quad (16)$$

где λ_p, λ_m – коэффициенты пропорциональности, определяемые из условия прохождения новой поверхности текучести (и «микрoпластического»

нагружения соответственно) через конец вектора девиатора напряжений в конце этапа нагружения.

Под поврежденностью материала ω в рамках настоящей работы понимается относительная объемная доля дефектов в эталонном элементарном объеме материала:

$$\omega = \frac{V}{V_f}, \quad 0 \leq \omega \leq \omega_f \leq 1, \quad (17)$$

где V – текущая объемная доля дефектов; V_f – критическая объемная доля, соответствующая образованию в данном объеме материала макроскопической трещины.

Для формулировки эволюционных уравнений развития поврежденности использован подход, основанный на установлении связи скоростей ω с некоторыми механическими параметрами, зависящими от процесса деформирования материала, критическое значение которых определяет момент полного разрушения элементарного объема материала. Наиболее эффективным подходом решения этой проблемы является энергетический подход.

Основываясь на экспериментальных и теоретических результатах работ [6–7] в рамках настоящей работы в качестве энергии повреждения принимается следующее соотношение:

$$W = \sum_1^{N_f} \left(\rho_{ij}^p \Delta e_{ij}^p + \rho_{ij}^m \Delta e_{ij}^m \left[1 - f(\gamma) \right] \right), \quad (18)$$

где $f(\gamma)$ – функция, учитывающая относительную величину «неопасной» энергии, затраченной на микрoпластическое деформирование материала; W – энергия повреждения при совместном действии мало- и многоциклового усталости.

В общем виде функция $f(\gamma)$ является экспериментально получаемой скалярной функцией. Анализ экспериментальных результатов, приведенных в статье [7], для различных конструкционных металлов и сплавов позволил определить наиболее общий вид искомой $f(\gamma)$, как функции зависящей от параметра $\gamma = \sigma_u / C_p$, характеризующего относительный уровень действующий напряжений в цикле нагружения:

$$f(\gamma) = \begin{cases} 0, & \text{при } \gamma > 1 \\ 1 - \left(\frac{\gamma - \gamma_*}{1 - \gamma_*} \right)^n, & \text{при } \gamma_* \leq \gamma \leq 1, \\ 1, & \text{при } \gamma < \gamma_* \end{cases} \quad (19)$$

где γ_*, n – параметры модели.

Уравнение накопления повреждений при усталости (малоциклового и многоциклового) в кинетической форме можно записать следующим образом:

$$\dot{\omega} = f_1(\beta) f_2(\omega) f_3(W) f_4(\dot{W}), \quad (20)$$

Исследование процесса неупругого деформирования и накопления повреждений при одночастотном малоцикловом и многоцикловом нагружении образцов

где $f_1(\beta)$ – функция, учитывающая объемность напряженного состояния; $f_2(\omega)$ – функция, учитывающая уровень накопленной поврежденности; $f_3(W)$ – функция, учитывающая накопленную энергию повреждения, затраченную на образование дефектов; $f_4(\dot{W})$ – функция, учитывающая скорость изменения энергии повреждения.

Принимается, что на стадии развития рассеянных по объему повреждений наблюдается влияние поврежденности на физико-механические характеристики материала, что можно учесть введением эффективных напряжений [4].

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

$$\omega = \omega_f \leq 1. \quad (21)$$

Интегрируя эволюционное уравнение накопления повреждений (20) совместно с уравнениями, описывающими процессы деформирования, (1) – (19) и критерием разрушения (21) по известной истории термомеханического нагружения в рассматриваемом элементарном объеме материала можно определить момент образования макроскопической трещины при деградации материала по механизмам малоциклового и многоциклового усталости (с учетом их взаимного влияния).

В работе [8] приведены результаты экспериментальных исследований процесса накопления повреждений при циклическом нагружении цилиндрических образцов из конструкционных сталей – среднеуглеродистой стали 20 и аустенитных сталей 08X18H12T(I) (исходное состояние) и 08X18H12T(II) (сталь после эксплуатационной наработки). Испытания образцов на усталость осуществлялись при нормальной температуре в результате растяжения-сжатия в условиях контролируемого осевого напряжения различной амплитуды и асимметричного цикла нагружения.

На рис. 1 продемонстрированы диаграммы циклического деформирования образцов для разных марок конструкционной стали.

На рис. 1 приведены режимы нагружения: с амплитудой $\sigma_a = 300$ МПа (рис. 1,а) и 250 МПа (рис. 1,б) для стали 08X18H12T(I), с амплитудой $\sigma_a = 280$ МПа (рис. 1,в) и 240 МПа (рис. 1,г) – для стали 08X18H12T(II), с амплитудой $\sigma_a = 300$ МПа (рис. 1,д) и 240 МПа (рис. 1,е) – для стали 20.

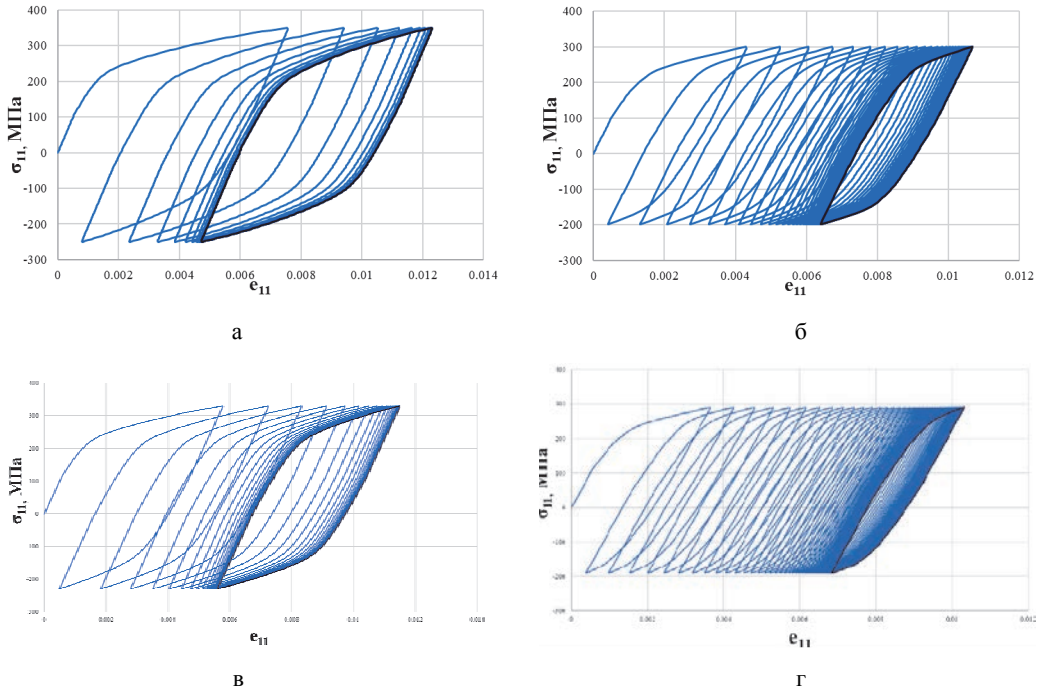


Рис. 1. Диаграммы циклического деформирования образцов: а, б – для стали 08X18H12T(I) и $\sigma_a = 300$ МПа и 250 МПа, соответственно; в, г – для стали 08X18H12T(II) и $\sigma_a = 280$ МПа и 240 МПа, соответственно; д, е – для стали 20 и $\sigma_a = 300$ МПа и 240 МПа, соответственно. Окончание см. на с. 14

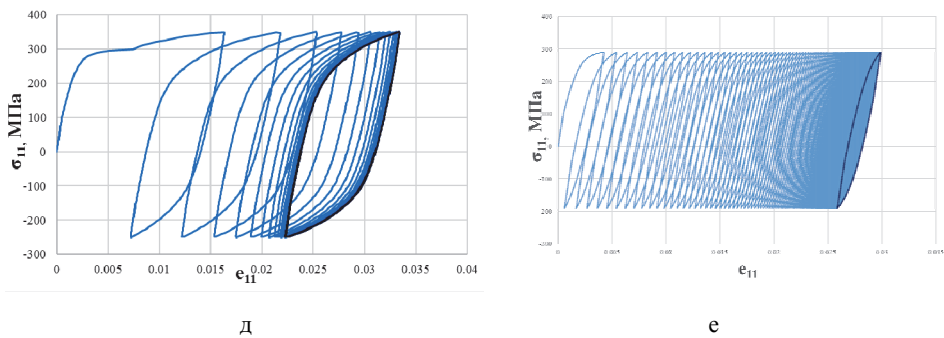
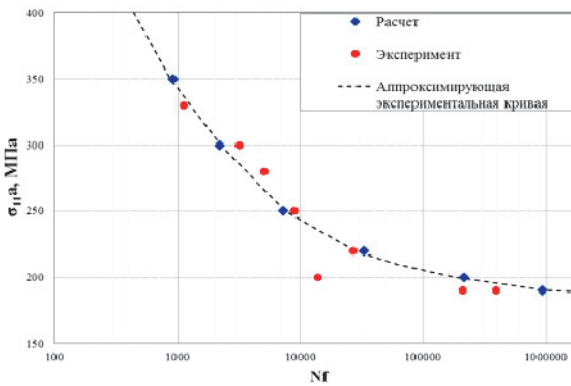


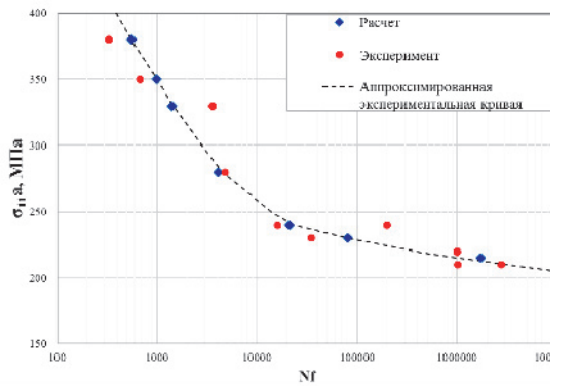
Рис. 1. Окончание

На рис. 2 представлено сопоставление расчетных и экспериментальных кривых усталости в координатах амплитуда напряжений (σ_{11}^a) – число циклов до разрушения (N_f) для разных марок конструкционной стали. На рис. 2,а представлены результаты численного моделирования, полученным по программе для ЭВМ «Resource», на рис. 2,б – экспериментальные

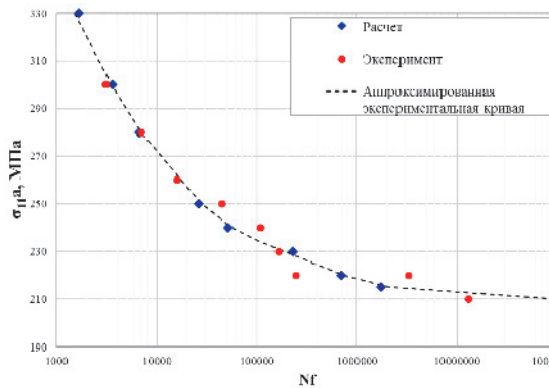
данные, приведенные в статье [8], на рис. 2,в – аппроксимация экспериментальных данных. На рис. 2 круглыми маркерами обозначены экспериментальные данные, ромбами – результаты численного моделирования, пунктирная линия соответствует аппроксимации экспериментальных данных.



а



б



в

Рис. 2. Кривые усталости: а – сталь 08X18N12Т(I), б – сталь 08X18N12Т(II), в – сталь 20

В табл. 1 приведены результаты численного моделирования усталостной долговечности конструкционных сталей 08X18H12T(I), 08X18H12T(II) и 20 для различных значений амплитуд нагружающего напряжения.

Таблица 1

Усталостная долговечность при одночастотном нагружении

Материал образцов	Среднее напряжение цикла, σ_m , МПа	Амплитуда напряжения цикла, σ_a , МПа	Расчетное число циклов до разрушения, N_f
Сталь 08X18H12T(I)	50	350	918
		300	2204
		250	7263
		220	32911
		200	216691
		190	938916
Сталь 08X18H12T(II)	50	380	557
		350	993
		330	1422
		280	4055
		240	20930
		230	81163
Сталь 20	50	215	1718256
		330	1644
		300	3550
		280	6694
		250	26071
		240	51764
		230	227848
		220	694630
		215	1740976

Анализ результатов численного моделирования показывает хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных. Относительное отклонение расчетного количества циклов до разрушения, полученного по программе для ЭВМ «Resource», от экспериментальных аппроксимированных значений не превышает 20 %, причем в области малоцикловых нагружений максимальное относительное отклонение составляет 10 %.

Исследование процесса неупругого деформирования и накопления повреждений при двухчастотном нагружении образцов

В работе [8] также приведены результаты экспериментальных исследований процесса накопления повреждений при циклическом двухчастотном нагружении цилиндрических образцов из среднеуглеродистой стали 20 и аустенитных сталей 08X18H12T(I) и 08X18H12T(II). Испытания образцов на усталость осуществлялись при нормальной температуре в результате растяжения-сжатия в условиях различной контролируемой амплитуды осевого напряжения высокочастотной составляющей и пере-

менной асимметрии цикла, изменяющейся в пределах от 0 до 100 МПа.

Систематизированные данные, характеризующие закономерности циклического деформирования конструкционных сталей 08X18H12T(I) – рис. 3,а, 08X18H12T(II) – рис. 3,б и 20 – рис. 3,в в условиях одно- и двухчастотного нагружения, приведены на рис. 3. Диаграммы деформирования (зависимости амплитуды напряжения σ_a от стабилизированной амплитуды неупругой деформации) подтверждают процесс разупрочнения материалов в условиях двухчастотного нагружения – стабилизированные значения неупругой деформации наблюдаются при напряжениях, значительно меньших, чем при одночастотном нагружении.

На рис. 4 приведены усталостные кривые при одночастотном (получены в предыдущем разделе) и двухчастотном нагружении образцов, изготовленных из сталей 08X18H12T(I) – рис. 4,а, 08X18H12T(II) – рис. 4,б. и 20 – рис. 4,в, соответственно.

На рис. 4 круглыми маркерами обозначены экспериментальные данные, ромбами – результаты численного моделирования, пунктирная линия соответствует аппроксимации экспериментальных данных.

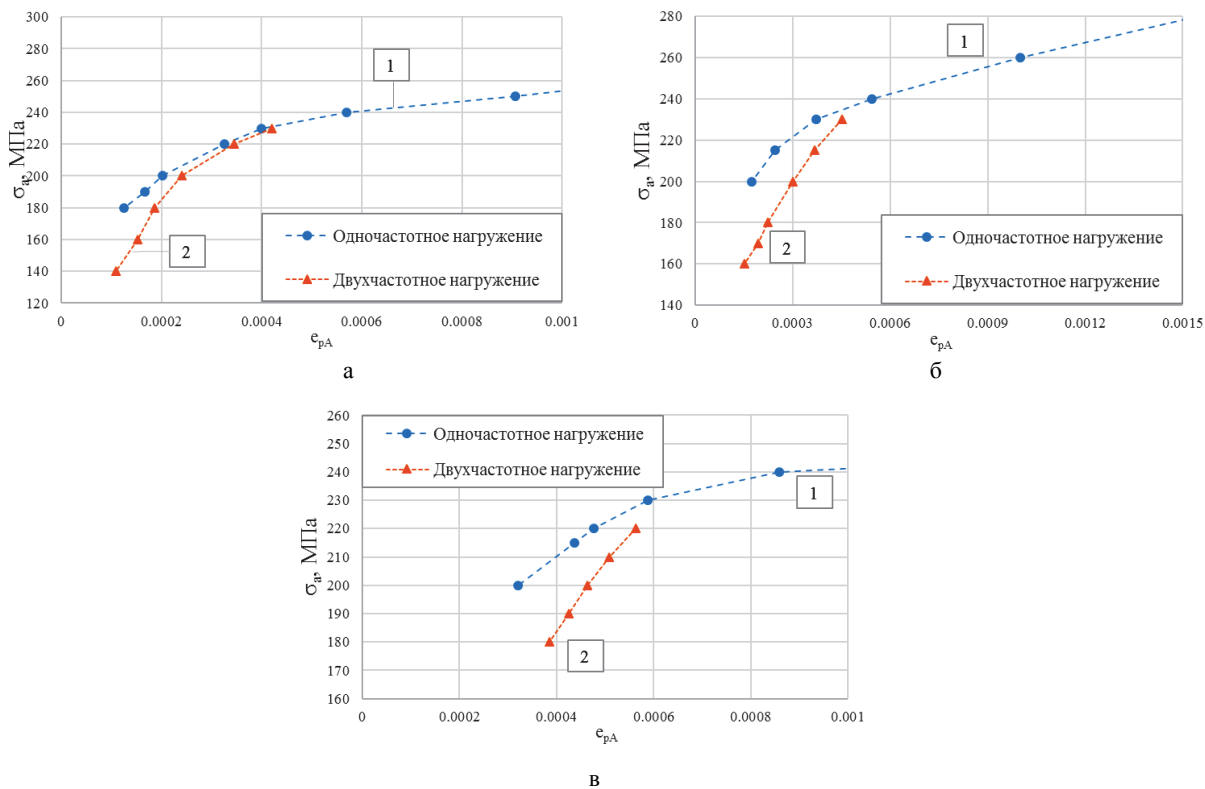


Рис. 3. Диаграмма циклического деформирования: а – стали 08Х18Н12Т(І), б – стали 08Х18Н12Т(ІІ), в – стали 20; 1 – одночастотное нагружение, 2 – двухчастотное нагружение

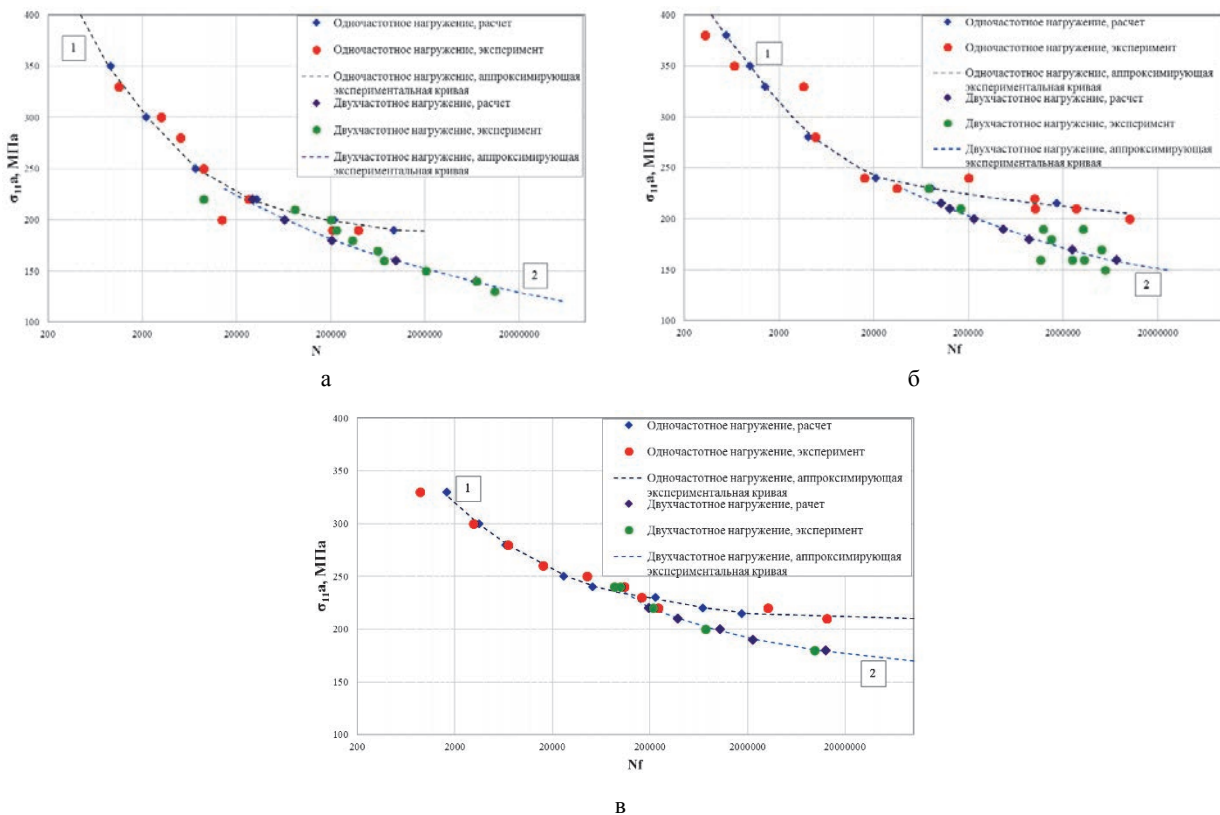


Рис. 4. Кривые усталости: а – стали 08Х18Н12Т(І), б – стали 08Х18Н12Т(ІІ), в – стали 20; 1 – одночастотное нагружение, 2 – двухчастотное нагружение; σ_{11}^a – амплитуда напряжений, N_f – число циклов высокой частоты до разрушения

В табл. 2 приведены результаты численного моделирования усталостной долговечности конструкционных сталей при двухчастотном нагружении.

Таблица 2

Усталостная долговечность при двухчастотном нагружении

Материал образцов	Амплитуда высокочастотной составляющей напряжения цикла, σ_a , МПа	Расчетное число циклов до разрушения, N_f
Сталь 08X18H12T(I)	220	29634
	200	64883
	180	205014
	160	983287
	140	6921603
Сталь 08X18H12T(II)	215	103353
	210	127090
	200	230249
	190	465626
	180	874690
	170	2486801
Сталь 20	160	7304668
	220	194455
	210	382401
	200	1036968
	190	2255929
	180	12654902

Анализ результатов численного моделирования показывает хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных (относительное отклонение расчетного количества циклов до разрушения, полученного по программе для ЭВМ «Resource», от экспериментальных аппроксимированных значений не превышает 25 %).

Результаты эксперимента и численных расчетов демонстрируют, что при двухчастотном нагружении наблюдается снижение сопротивления усталостному разрушению. Это объясняется процессом разупрочнения материала при данном виде нагружения.

Численный анализ усталостной долговечности полосы с круглым отверстием

Рассмотрим процесс изотермического упруго-пластического деформирования и накопления усталостных повреждений в полосе с круглым отверстием, выполненной из нержавеющей стали 304, в условиях циклического знакопеременного нагружения

[4], [9], [10]. На концах полосы приложено осевое усилие, циклически изменяющееся между максимальным и минимальным значением с постоянной амплитудой. Амплитудные значения в симметричном цикле нагружения изменялись в диапазоне от -20 кН до 20 кН; в несимметричном цикле – от -10 кН до 20 кН, в отнулевом – от 0 до 20 кН.

На рис. 5 приведено распределение интенсивности неупругих деформаций для симметричного – рис. 5,а, несимметричного – рис. 5,б и отнулевого – рис. 5,в режимов нагружения и интенсивности напряжений для симметричного – рис. 5,г, несимметричного – рис. 5,д и отнулевого – рис. 5,е режимов нагружения. Расчеты проведены по программе ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ [11] (с использованием модели термопластичности, уравнения которой приведенной выше). Максимальные значения рассматриваемых величин наблюдаются у основания отверстия (наиболее нагруженная зона).

На рис. 6 показаны расчетные зависимости для наиболее нагруженной зоны в сравнении с приведенными в [9].

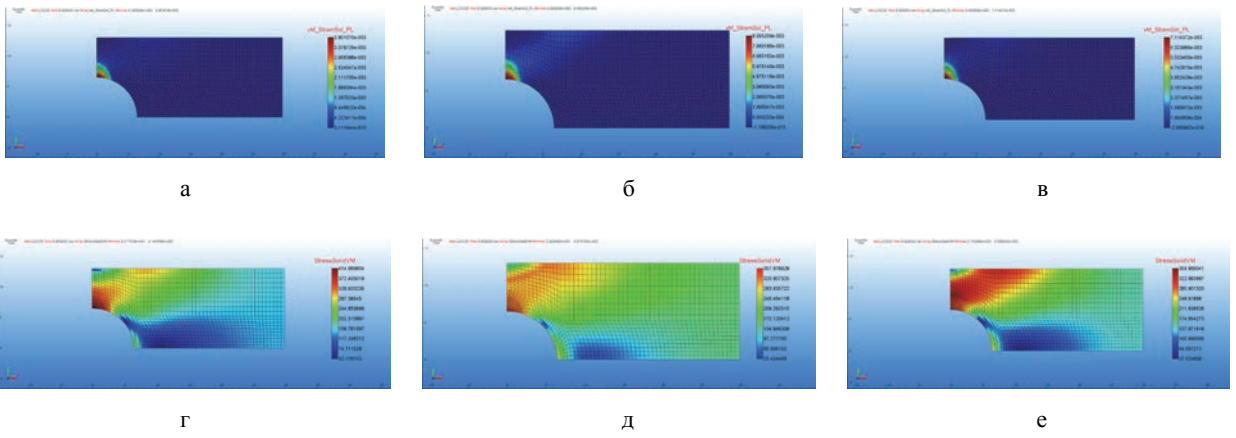


Рис. 5. Распределение: а – интенсивности неупругих деформаций в конце 11-го этапа симметричного режима нагружения (6-ой цикл), б – интенсивности неупругих деформаций в конце 21-го этапа несимметричного режима нагружения (11-ый цикл), в – интенсивности неупругих деформаций в конце 23-го этапа отнулевого режима нагружения (12-ый цикл), г – интенсивности напряжений в конце 11-го этапа симметричного режима нагружения (6-ой цикл), д – интенсивности напряжений в конце 21-го этапа несимметричного режима нагружения (11-ый цикл), е – интенсивности напряжений в конце 23-го этапа отнулевого режима нагружения (12-ый цикл)

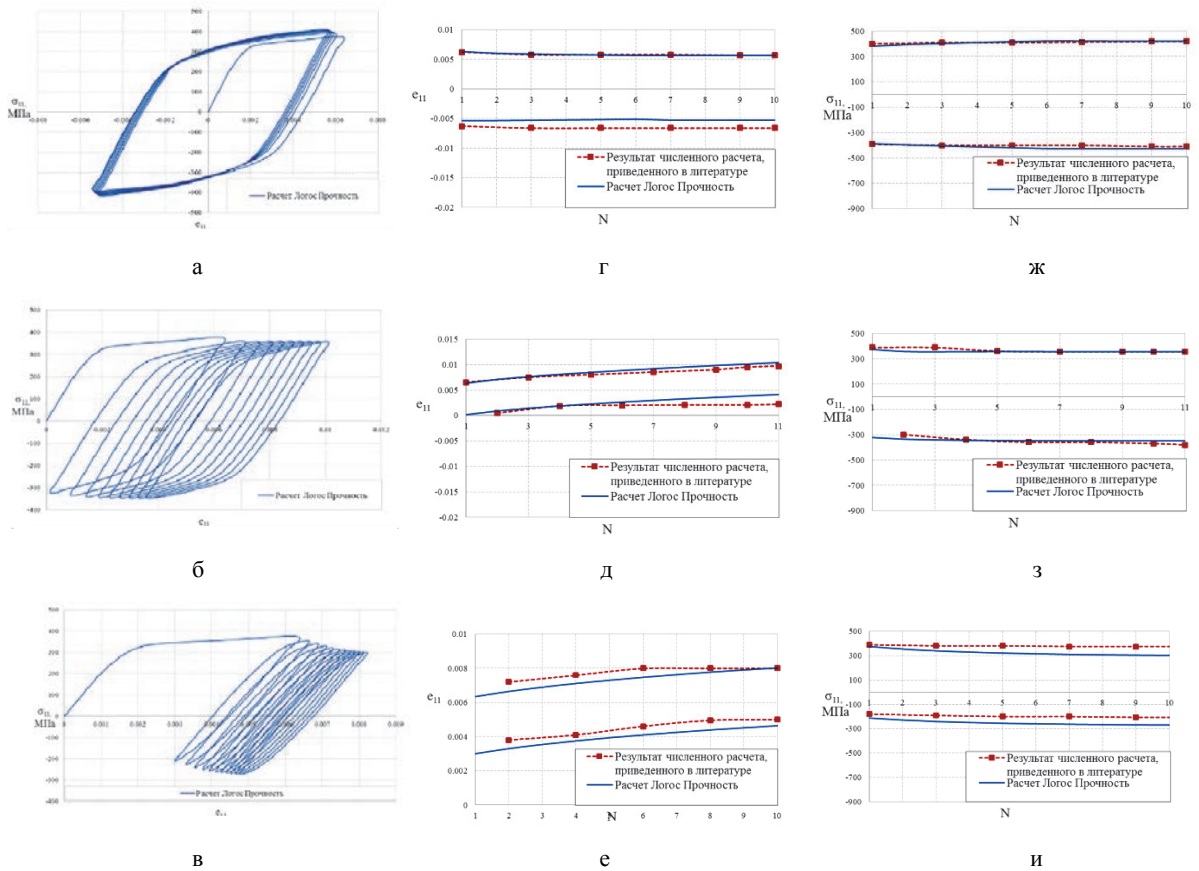


Рис. 6. Расчетные зависимости: а – осевого напряжения от осевой деформации для симметричного режима нагружения; б – осевого напряжения от осевой деформации для несимметричного режима нагружения; в – осевого напряжения от осевой деформации для отнулевого режима нагружения; г – изменения односторонне накопленной осевой деформации в цикле для симметричного режима нагружения; д – изменения односторонне накопленной осевой деформации в цикле для несимметричного режима нагружения; е – изменения односторонне накопленной осевой деформации в цикле для отнулевого режима нагружения; ж – изменения максимального (минимального) осевого напряжения в цикле от номера цикла для симметричного режима нагружения; з – изменения максимального (минимального) осевого напряжения в цикле от номера цикла для несимметричного режима нагружения; и – изменения максимального (минимального) осевого напряжения в цикле от номера цикла для отнулевого режима нагружения

На рис. 7 продемонстрирована поврежденность в каждой ячейке «опасной» зоны на момент разрушения (т. е. на момент, когда в одной ячейке поврежденность превысила критическое значение) для разных режимов нагружения.

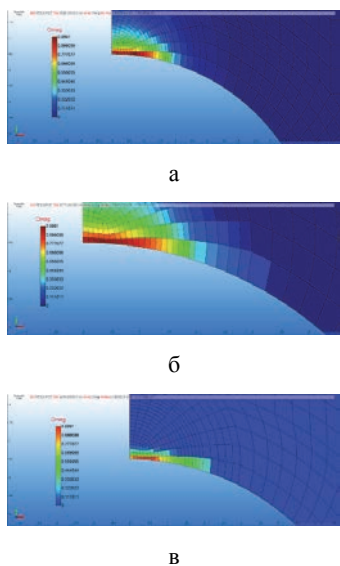


Рис. 7. Поврежденность в каждой ячейке «опасной» зоны на момент разрушения: а – для симметричного режима нагружения, б – для несимметричного режима нагружения, в – для отнулевого режима нагружения

В табл. 3 приведен совокупный анализ усталостной долговечности полосы с отверстием при разных режимах нагружения: расчетное количество циклов до образования макроскопической трещины, полученное по программе для ЭВМ «Resource», расчетные данные из литературных источников [4], [10], демонстрирующий, что отклонение результатов численного моделирования от результатов, приведенных в литературе, не превышает 10 %.

Таблица 3

Усталостная долговечность полосы с отверстием

Режим нагружения	Количество циклов до разрушения			Относительное отклонение	
	[4]	[10]	Расчет	$\delta[4], \%$	$\delta[10], \%$
Симметричный режим	1669	1850	1834	9,89	0,86
Несимметричный режим	6560	6900	6297	4,01	8,74
Отнулевой режим	16485	15825	17148	4,02	8,36

Заключение

В рамках настоящей работы выполнено обоснование возможности использования программы для ЭВМ «Resource» для исследования закономерностей неупругого деформирования и разрушения конструкционных материалов при одночастотном (малоцикловом и многоцикловом) и двухчастотном

нагружении. Погрешность расчета параметров напряженно-деформированного состояния и процесса накопления усталостных повреждений соизмерима с разбросом экспериментальных данных и не превышает 25 %.

Список литературы

1. Десятникова М. А. Программное средство «Resource». Моделирование процессов пластического деформирования и накопления усталостных повреждений при сложных режимах малоциклового нагружения // 18 научно-техническая конференция «Молодежь в науке» // Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2020. Т. 1. С. 11–20.
2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПН АЭ Г-7-008-86. М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 124.
3. Волков И. А., Коротких Ю. Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит, 2008.
4. Волков И. А., Игумнов Л. А. Введение в континуальную механику поврежденной среды. М.: Физматлит, 2017.
5. Волков И. А., Игумнов Л. А., Шишулин Д. Н. и др. Моделирование усталостной долговечности поликристаллических конструкционных сплавов при блочном несимметричном малоцикловом нагружении // Проблемы прочности и пластичности. 2018. Т. 80, № 1. С. 15–30.
6. Новожилов В. В. О перспективах феноменологического подхода к проблеме разрушения // Механика деформируемых тел и конструкций. М.: Машиностроение. 1975. С. 349–353.
7. Бондарь В. С. Сравнительный анализ вариантов теорий пластичности при циклических нагружениях // Вестник ПНИПУ. Механика. 2017, № 2. С. 23–44.
8. Хамаза Л. А., Коваленко В. А. Сопротивление металлов усталостному разрушению и деформированию при двухчастотном нагружении. Сообщение 1. Методика и результаты исследования усталости и неупругости металлов при двухчастотном циклическом нагружении // Проблемы прочности. 1989, № 10. С. 7–13.
9. Исикава Х. И., Сасаки К. Численный расчет полосы с отверстием при циклическом нагружении // Современное машиностроение. Сер.Б. 1991, № 4. С. 50–56.
10. Замбалов С. Д. Математические модели и численные методы решения связанных задач МДТТ для прогнозирования деформации и усталостной долговечности элементов конструкций в сложных режимах нагружения: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2015.
11. Барабанов Р. А., Дьянов Д. Ю., Циберев К. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Конечно-элементная методика расчета задач статической прочности конструкций с учетом эффектов физической и геометрической нелинейности // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2014. Т. 3. С. 3–17.