

УДК 621.039.53

А.В. Козин¹, Д.А. Лапшин¹, В.А. Панов¹, В.А. Пахомов¹, М.А. Легчанов²**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ОБОРУДОВАНИЯ ЯЭУ**Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова¹
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Представлена расчетно-экспериментальная методика определения параметров математической модели механики поврежденной среды для анализа процессов накопления повреждений в конструкционных материалах оборудования и систем ЯЭУ в области малоциклового усталости (МЦУ). Приведены результаты расчетных исследований закономерностей влияния этих параметров на темпы накопления усталостных повреждений, форму графиков накопления повреждений и вид кривых усталости конструкционных материалов. Показано, что разработанная математическая модель при определенных комбинациях значений параметров позволяет адекватно исследовать процессы накопления повреждений с использованием как линейного, так и нелинейного суммирования повреждений. Представлены результаты сопоставительного анализа расчетных кривых усталости для материала 08X18H10T при $T=20^{\circ}\text{C}$, построенных с использованием разработанной математической модели при различных способах суммирования повреждений и методов «Норм прочности» (правило «дождя», линейное суммирование повреждений). Все полученные расчетным путем усталостные кривые располагаются в области разброса экспериментальных данных. Показана возможность применения разработанной математической модели и программных средств для альтернативной оценки поврежденности конструкционных материалов оборудования и систем ЯЭУ по сравнению с нормативным подходом.

Ключевые слова: математическая модель, параметры модели, конструкционный материал, накопление повреждений, линейное суммирование повреждений, усталостная кривая, ресурс ЯЭУ.

Введение

В процессе эксплуатации конструктивные элементы оборудования и трубопроводов ЯЭУ подвергаются воздействию интенсивных циклических термомеханических нагрузок, которые являются следствием сложных гидродинамических и теплофизических процессов, возникающих во время их работы. Выполненный анализ имевших место случаев разрушения конструктивных элементов, результатов металлографических и расчётных исследований выявил, что в условиях циклического неизотермического нагружения накопление повреждений осуществляется по механизму малоциклового усталости. Соответственно, актуальной является задача обоснования циклической прочности оборудования и систем ЯЭУ, оценки выработанного и прогноза остаточного ресурса в процессе эксплуатации. В соответствии с действующими в настоящее время нормативными документами, при расчете на циклическую прочность используются условно-упругие напряжения и закон линейного суммирования повреждений. При этом последовательность эксплуатационных режимов нагружения конструктивных элементов оборудования и систем ЯЭУ строится по методу «дождя» [1], которая не имеет ничего общего с фактической последовательностью режимов нагружения. Такой нормативный подход при оценке уровня повреждений материала характеризуется невысокой точностью, а принимаемые на его основе решения о продлении ресурса оборудования ЯЭУ не являются оптимальными.

Для проведения более точного анализа накопления повреждений элементов оборудования и трубопроводов ЯЭУ целесообразно использовать активно развивающиеся в последние годы методы механики поврежденной среды (МПС). В связи с этим, для моделирования процессов неизотермического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в конструкционных материалах (металлах и их сплавах) оборудования

и систем при нерегулярных термомеханических нагружениях разработана математическая модель механики поврежденной среды [2]. Она содержит ряд экспериментально определяемых параметров (констант), существенно влияющих в процессе расчетов на темпы накопления усталостных повреждений и определяющих вид графиков накопления повреждений и расчетных кривых усталости конструкционных материалов. Знание закономерностей влияния данных параметров на темпы накопления повреждений позволяет однозначно определять их значения по известным экспериментальным кривым накопления повреждений и кривым усталости конструкционных материалов, а также адекватно исследовать процессы накопления повреждений в конструктивных элементах оборудования ЯЭУ при сложных напряженно-деформированных состояниях.

Математическая модель процессов накопления усталостных повреждений

В [2] приведена математическая модель для исследования процессов накопления усталостных повреждений в конструкционных материалах оборудования и систем ЯЭУ при термомеханических нагружениях. В данной модели эволюционное уравнение накопления усталостных повреждений записывается в виде (1):

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

где физическая мера поврежденности материала ω характеризуется относительной объемной долей дефектов в эталонном элементарном объеме материала (2):

$$\omega = \frac{V}{V_f}; \Delta\omega = \frac{\Delta V}{V_f}; \omega = \sum \Delta\omega; 0 \leq \omega \leq \omega_f \leq 1, \quad (2)$$

Текущая объемная доля дефектов V достаточно хорошо контролируется новыми физическими методами неразрушающего контроля – спектрально-акустической системой «Астрон» [3] и методом вдавливания индентора [4], V_f – критическая объемная доля, соответствующая образованию в данном объеме материала макроскопической трещины с характерным размером $\sim 1 \div 2$ мм. α, r – экспериментально определяемые параметры материала.

Уравнение (1) интегрируется вдоль траектории деформирования (заданной истории изменения компонент тензора полных деформаций $e_{ij}(t)$ и температуры $T(t)$) с использованием явной схемы Эйлера, при этом интеграл (1) примет следующий вид (3):

$$\omega = 1 - \left\{ 1 - (\alpha + 1) \int_0^z f(\beta) z^\alpha dz \right\}^{1/(r+1)}. \quad (3)$$

Экспериментальные и теоретические исследования влияния многоосности НДС при различных видах напряженных состояний [5] (двухосное и трехосное растяжение-сжатие) выявили существенное влияние на усталостную долговечность «жесткости» напряженного состояния, характеризуемого интенсивностью тензора напряжений σ_u и его шаровой (гидростатической) компонентой σ (4):

$$\sigma_u = (\sigma'_{ij} \sigma'_{ij})^{1/2}, \quad \sigma = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} = \frac{\sigma_{ii}}{3}. \quad (4)$$

где σ и σ'_{ij} – шаровая и девиаторная составляющие тензора напряжений.

В работе [2] отмечается, что характеристики напряженного состояния σ и σ_u играют определяющую роль в процессе зарождения и накопления дефектов: шаровая составляющая σ увеличивает (при $\sigma < 0$) или уменьшает (при $\sigma > 0$) энергетический барьер, препятствующий образованию дефектов в материале конструкций, оставляя его симметричным, девиаторная часть снижает энергетический барьер в направлении нагружения (вектора девиатора) и увеличивает его в противоположном направлении. Процессы зарождения и накопления де-

фектов в твердом теле могут протекать только в том случае, если девиаторная часть тензора напряжений σ_u отлична от нуля.

В качестве параметра «жесткости» напряженного состояния используются параметр β или функции от β (5):

$$\beta = \frac{\sigma}{\sigma_u}; \quad k = \left[1 + \frac{3(1-2\nu)}{(1+\nu)} \beta^2 \right], \quad (5)$$

где k – параметр Леметра [3], ν – коэффициент Пуассона.

Функция $f(\beta)$, входящая в (1) и характеризующая объемность напряженного состояния, может быть представлена в форме (6):

$$f(\beta) = [1 + k\beta^2]^a, \quad a = \begin{cases} -a_1 & \text{при } \beta < 0 \quad (a_1 > 0) \\ a_2 & \text{при } \beta \geq 0 \quad (a_2 > 0) \end{cases}, \quad (6)$$

где a_1 и a_2 – материальные параметры модели, определяемые расчетным путем с использованием результатов испытаний на циклическую долговечность лабораторных образцов при знакопеременном кручении и одноосном растяжении-сжатии (с помощью подбора этих параметров кривую усталости при знакопеременном кручении ($a_1 = a_2 = 0$) можно трансформировать в кривую усталости при одноосном растяжении-сжатии ($a_1 \neq 0, a_2 \neq 0$)).

Функцию $f(\beta)$ можно представить также в форме (7):

$$f(\beta) = e^{a \frac{\beta}{\beta_p}}, \quad (7)$$

где β_p – «жесткость» напряженного состояния при одноосном растяжении-сжатии, e – основание натуральных логарифмов ($e \approx 2,718$).

Учитывая, что при одноосном растяжении-сжатии $\sigma = \frac{\sigma_{11}}{3}$ и $\sigma_u = \left(\frac{6}{9} \sigma_{11}^2\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{6}}{3} \sigma_{11}$,

получим выражение для $\beta_p = \frac{1}{\sqrt{6}}$, с учетом которого функция (7) примет следующий вид (8):

$$f(\beta) = e^{a\sqrt{6}\beta}, \quad (8)$$

где a вычисляется согласно (6).

Численные исследования показали, что применение функций в виде (6) и (7) при расчете циклической долговечности лабораторных образцов при знакопеременном кручении и циклическом одноосном растяжении-сжатии приводит практически к одним и тем же результатам.

В выражении (1) параметр z имеет вид [2] (9):

$$z = \frac{W_p - W_a}{W_f - W_a}, \quad (9)$$

где W_p – текущее значение энергии, затраченной на образование дефектов; W_a – значение этой энергии, соответствующее первой (инкубационной) стадии процесса накопления повреждений, W_f – значение этой энергии, соответствующее зарождению макроскопической трещины $\sim 1 \div 2$ мм; $W_p = \sum \langle \rho_{ij} \Delta e_{ij}^p \rangle$, где ρ_{ij} – координаты центра поверхности текучести.

В АО «ОКБМ Африкантов» разработан программный комплекс «Ресурс-НН» [6], который позволяет по заданной истории изменения компонент тензора полных деформаций $e_{ij}(t)$ и температуры $T(t)$ исследовать процессы неизотермического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений.

Определение параметров математической модели накопления повреждений

Технология определения перечисленных выше параметров (констант) разработанной математической модели накопления усталостных повреждений (α и r в выражении (1), a_1 и a_2 в выражении (7), W_f и W_a в выражении (8) и соответствующие им значения N_f и N_a , где N_f – число циклов до образования макротрещины, N_a – продолжительность первой фазы накопления повреждений), заключается в следующем. Во-первых, экспериментальным путем с использованием лабораторных образцов для различных базовых температур ($T = 20^0, 50^0, 100^0, 150^0C$ и т.д.) при некоторой заданной амплитуде интенсивности пластических деформаций Δe_u^p в цикле (и соответствующим ей амплитудам деформаций при знакопеременном кручении Δe_{12} и одноосном растяжении-сжатии Δe_{11}) должны быть определены два основных параметра математической модели: число циклов до образования макроскопической трещины (с характерным размером $\sim 1 \div 2$ мм) при знакопеременном кручении N_f^{kp} и аналогичный параметр при одноосном растяжении-сжатии N_f^{p-c} , которые позволяют сразу определить значения всех остальных параметров математической модели накопления усталостных повреждений: предельное значение работы разрушения W_f (работы, затраченной на образование макроскопической трещины); значение работы разрушения W_a в конце первой фазы зарождения дефектов при МЦУ и соответствующее ему число циклов нагружения N_a и т.д. Амплитуда интенсивности пластических деформаций Δe_u^p , при которой экспериментально определяются перечисленные параметры, определяет так называемую «базовую» точку экспериментальной кривой усталости конструкционного материала. В связи с тем, что экспериментальное определение числа циклов до образования макроскопической трещины при знакопеременном кручении тонкостенного лабораторного образца N_f^{kp} сопряжено с определенными трудностями, то можно воспользоваться правилом, по которому число циклов до зарождения макроскопической трещины при знакопеременном кручении при той же амплитуде интенсивности пластических деформаций Δe_u^p можно увеличить приблизительно вдвое по сравнению с числом циклов до образования трещины при одноосном растяжении-сжатии, т.е. принять $N_f^{kp} \approx 2 \cdot N_f^{p-c}$. Однако такой приближенный способ определения значения N_f^{kp} для ряда конструкционных материалов не является достаточно корректным и противоречит опубликованным экспериментальным данным для других конструкционных материалов, в результате чего его применение может привести к значительным погрешностям в определении параметров модели и соответственно к дальнейшей неадекватной оценке циклической долговечности конструктивных элементов. На рис. 1 показаны две усталостные кривые для материала 08X18H10T при $T=20^0C$ для знакопеременного кручения и одноосного растяжения-сжатия (красные пунктирные линии), приведенные в [2, 7], N – число циклов нагружения. Видно, что приведенные усталостные кривые представляют собой прямые линии, что не соответствует реальным экспериментальным формам кривых усталости. Если на этих прямых линиях выбрать в качестве «базовых» точки, соответствующие амплитуде интенсивности пластических деформаций $\Delta e_u^p = 0,004$ (отмечены синими кружочками), то можно последовательно определить все важнейшие параметры математической модели накопления повреждений для материала 08X18H10T при $T=20^0C$:

$$N_f^{kp} = 4918 \text{ циклов}; N_f^{p-c} = 1825 \text{ циклов}; a_1 = a_2 = 3,54; W_f = 3685 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}.$$

Значения приведенных параметров модели определялись с использованием результатов расчетов по программе «Ресурс-НН» при следующих значениях амплитуд деформаций

в цикле для знакопеременного кручения $\Delta e_{12} = 0,00445$ и одноосного растяжения-сжатия $\Delta e_{11} = 0,00535$, соответствующих амплитуде интенсивности пластических деформаций $\Delta e_u^p = 0,004$ для «базовой» точки кривой усталости.

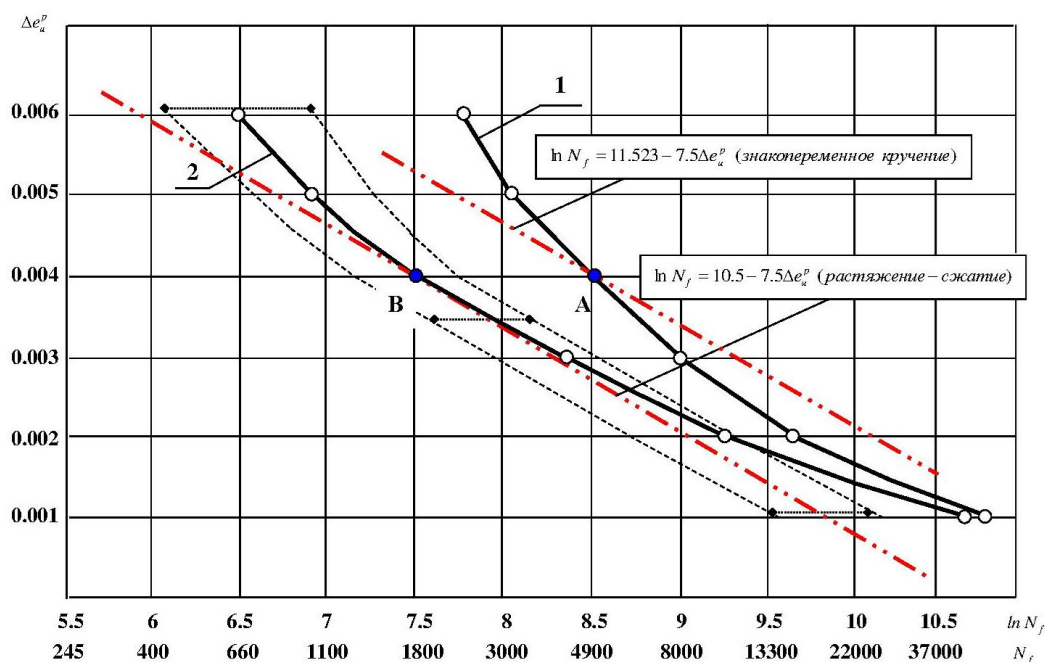


Рис. 1. Расчетные усталостные при закрепленном кручении (кривая 1) при одноосном растяжении-сжатии (кривая 2) (материал: сталь 08X18H10T), T=20° C

Значение N_a при одноосном растяжении-сжатии можно определить (в случае отсутствия экспериментальной информации для заданного конструкционного материала) с использованием известных экспериментальных законов Levaillant, Мэнсона и Yamaguchi и Kanazawa [8].

Из этого следует важный вывод. Критическая работа разрушения W_f , входящая в (8) и затрачиваемая на образование макроскопической трещины $\sim 1 \div 2$ мм, при некоторой заданной температуре материала T является величиной постоянной $W_f = W_f(T) = const$ и не зависит от перечисленных параметров модели, т.е. является характеристикой материала [2, 5]. Здесь следует сделать одно важное замечание. Значение параметра N_f^{kp} (число циклов до образования макроскопической трещины при знакопеременном кручении) при любых значениях амплитуды деформаций Δe_{12}^a в цикле нагружения не зависит от значений параметров α , γ , a_1 , a_2 , W_a : какие бы значения этих параметров или их комбинации не задавались, значение параметра N_f^{kp} при заданной амплитуде Δe_{12}^a будет оставаться неизменным.

Если воспользоваться эмпирической формулой Мэнсона, то для «базовой» точки кривой усталости для материала 08X18H10T можно получить следующие значения параметров для первой фазы накопления повреждений (10):

$$N_a^{kp} = 815 \text{ циклов}; W_a^{kp} = 655,8 \frac{Мдж}{м^3}; \Delta W_a^{kp} = 0,80466 \frac{Мдж}{м^3};$$

$$N_a^{p-c} = 885 \text{ циклов}; W_a^{p-c} = 610,5 \frac{Мдж}{м^3}; \Delta W_a^{p-c} = 0,6898 \frac{Мдж}{м^3}, \quad (10)$$

где ΔW_a^{kp} и ΔW_a^{p-c} – работа разрушения за цикл нагружения при знакопеременном кручении и одноосном растяжении-сжатии соответственно.

На рис. 1 приведены также расчетные кривые усталости материала 08X18H10T для знакопеременного кручения (график 1) и одноосного растяжения-сжатия (график 2) лабораторных образцов при $T=20^0\text{C}$, построенные по программе «Ресурс-НН» с использованием найденных значений параметров математической модели накопления усталостных повреждений. Пунктирными линиями показаны границы области разброса экспериментальных данных вокруг «средней» усталостной кривой при одноосном растяжении-сжатии образцов [2]. В работе показано также, что «средняя» расчетная усталостная кривая для стали 08X18H10T при одноосном растяжении-сжатии практически повторяет «среднюю» экспериментальную кривую усталости во всем диапазоне амплитуд деформаций в цикле. К сожалению, такое утверждение для случая знакопеременного кручения сделать нельзя, поскольку отсутствуют результаты экспериментальных исследований циклической долговечности образцов из материала 08X18H10T при таком виде нагружения. Из рис. 1 видно, что регрессионная зависимость Можаровского [7] для одноосного растяжения-сжатия не описывает экспериментальные данные при амплитуде интенсивности пластических деформаций в цикле $\Delta e_{II}^p > 0,004$ и в области перехода малоциклового усталости (МЦУ) в многоцикловую (МнЦУ) [2, 5].

По результатам проведенных расчетных исследований можно сделать важный вывод: определение параметров математической модели накопления усталостных повреждений по одной выбранной «базовой» точке позволяет расчетным путем достаточно точно восстановить всю экспериментальную усталостную кривую в области малоциклового усталости. Это является большим преимуществом предложенной математической модели (1)–(9), поскольку для ее адекватного применения требуется минимум экспериментальных данных. В связи с этим, представляет практический интерес вопрос об определении параметров математической модели накопления усталостных повреждений по другим «базовым» точкам усталостной кривой и каким образом выбор этих «базовых» точек будет сказываться на результатах расчетов циклической долговечности лабораторных образцов. Однако такие исследования не проводились в связи их большой трудоемкостью.

Расчетное исследование влияния параметров математической модели малоциклового усталости на форму графиков накопления усталостных повреждений и кривых усталости

Ниже приведены результаты расчетного исследования влияния параметров математической модели поврежденной среды на форму кривых накопления повреждений и вид кривых усталости. Проведение таких исследований обусловлено необходимостью расчетным путем с использованием значений данных параметров аппроксимировать (восстанавливать) форму экспериментальных кривых накопления усталостных повреждений и вид кривых усталости конструкционных материалов при одноосном растяжении-сжатии с целью адекватного определения циклической долговечности конструктивных элементов. Исследование проводилось на примере расчета циклической долговечности лабораторных образцов из материала 08X18H10T ($T=20^0\text{C}$) при регулярном симметричном одноосном растяжении-сжатии для различных амплитуд полных деформаций (и соответствующих им амплитуд интенсивности пластических деформаций) в цикле нагружения. Исследовалось влияние на темпы накопления повреждений следующих параметров модели: α и r (выражение (1)), a_1 и a_2 (выражение (7)), W_a (выражение (9)). Использовался аттестованный программный комплекс «Ресурс-НН» [6]. Результаты расчетных исследований, приведенные ниже, позволили выявить закономерности влияния перечисленных параметров математической модели на форму графиков накопления повреждений и вид усталостных кривых.

На рис. 2 показаны графики накопления усталостных повреждений, полученные для различных значений параметра α при $r = 0,3$ и $Wa \neq 0$ ($N_a \neq 0$) для «базовой» точки экспериментальной усталостной кривой, характеризуемой следующими значениями амплитуды

поврежденности $\omega_{и-сжати}$ $\Delta e_{11}^a = 0,00535$ ($\Delta e_{ii}^p = 0,004$). Из данных графиков видно, что если известно число циклов нагружения, на первой стадии накопления повреждений N_a и число циклов N_f до образования макротрещины $\sim 1 \div 2$ мм, то можно однозначно определить значение параметра α .

Поврежденность ω

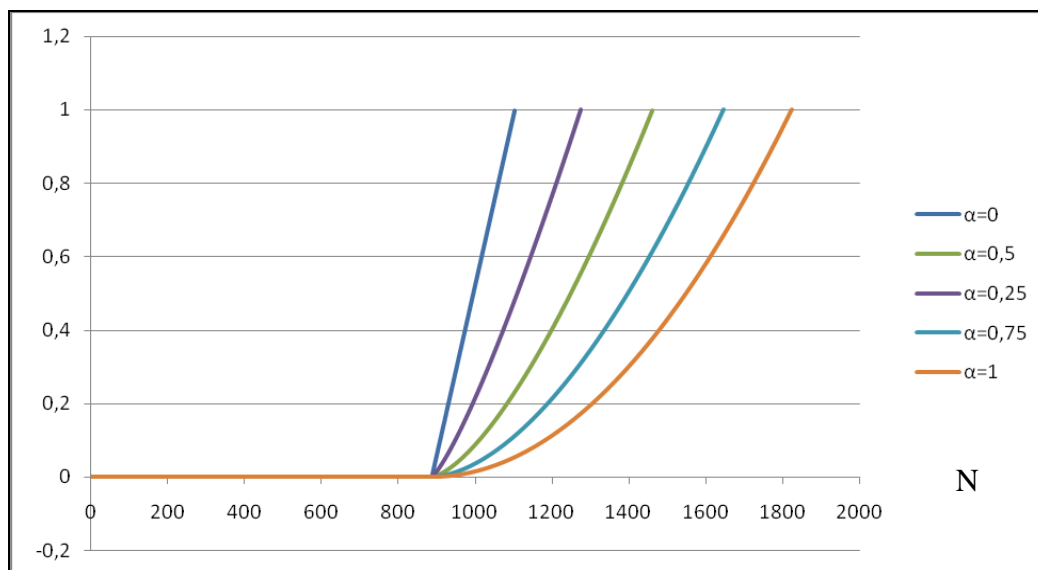


Рис. 2. Графики накопления усталостных повреждений для различных значений α ($r=0,3, Wa \neq 0$) (нелинейное суммирование повреждений)

Поврежденность ω

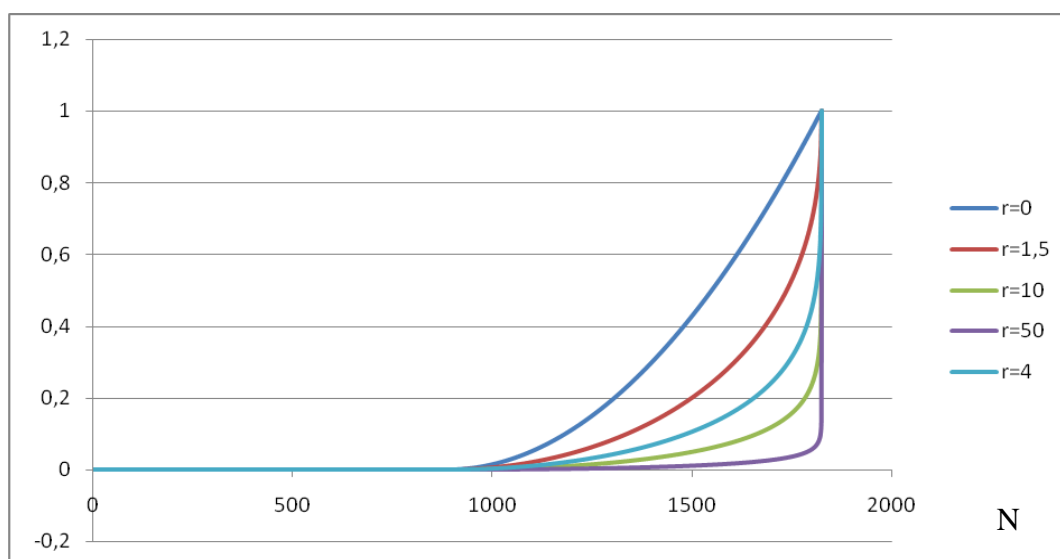


Рис. 3. Графики накопления усталостных повреждений для различных значений r ($\alpha=1, Wa \neq 0$) (нелинейное суммирование повреждений)

Поврежденность ω

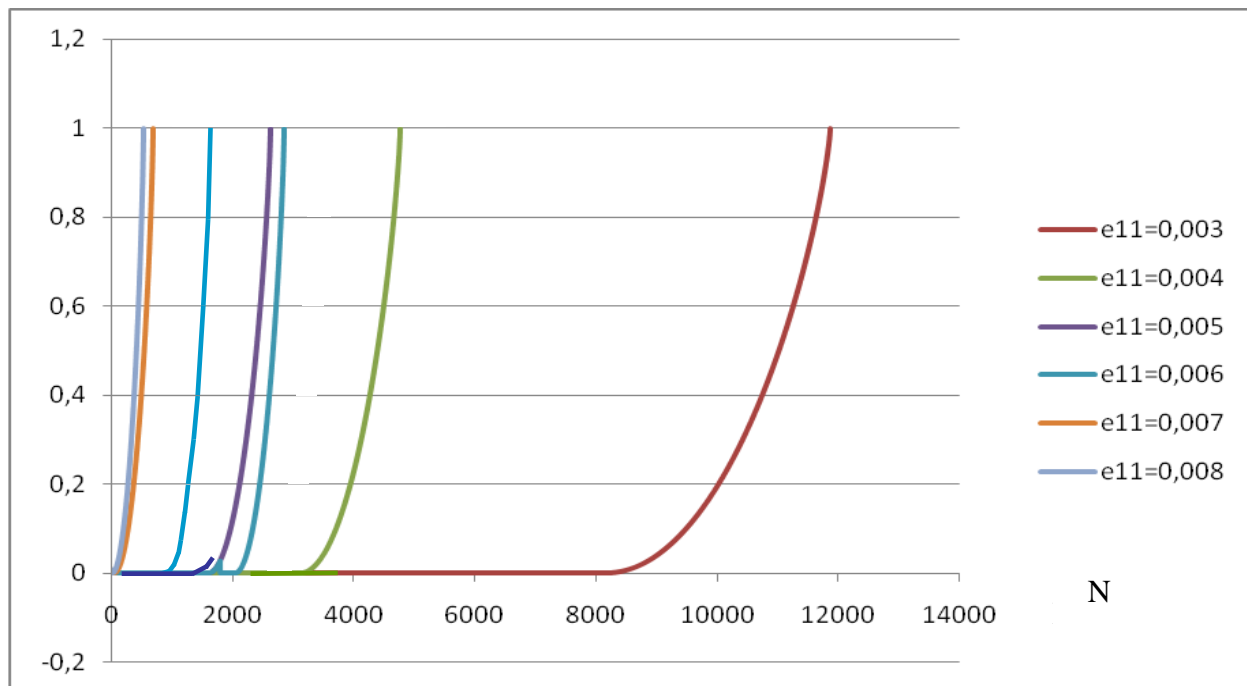


Рис. 4. Графики накопления усталостных повреждений при $\alpha=1$, $r=0,3$, $W_a \neq 0$, для различных амплитуд полных деформаций $e_{11}=0,003 \div 0,008$

Поврежденность ω

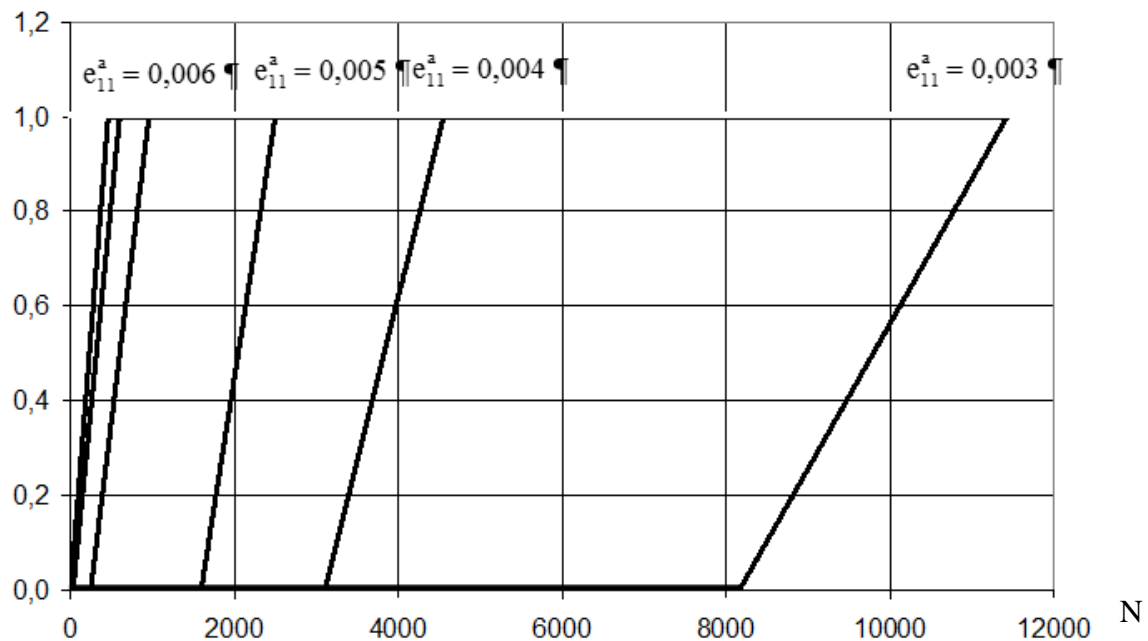


Рис. 5. Графики накопления усталостных повреждений при $\alpha=0$, $r=0$, $W_a \neq 0$ для различных амплитуд полных деформаций $e_{11}=0,003 \div 0,008$ (применяется правило линейного суммирования повреждений)

Поврежденность ω

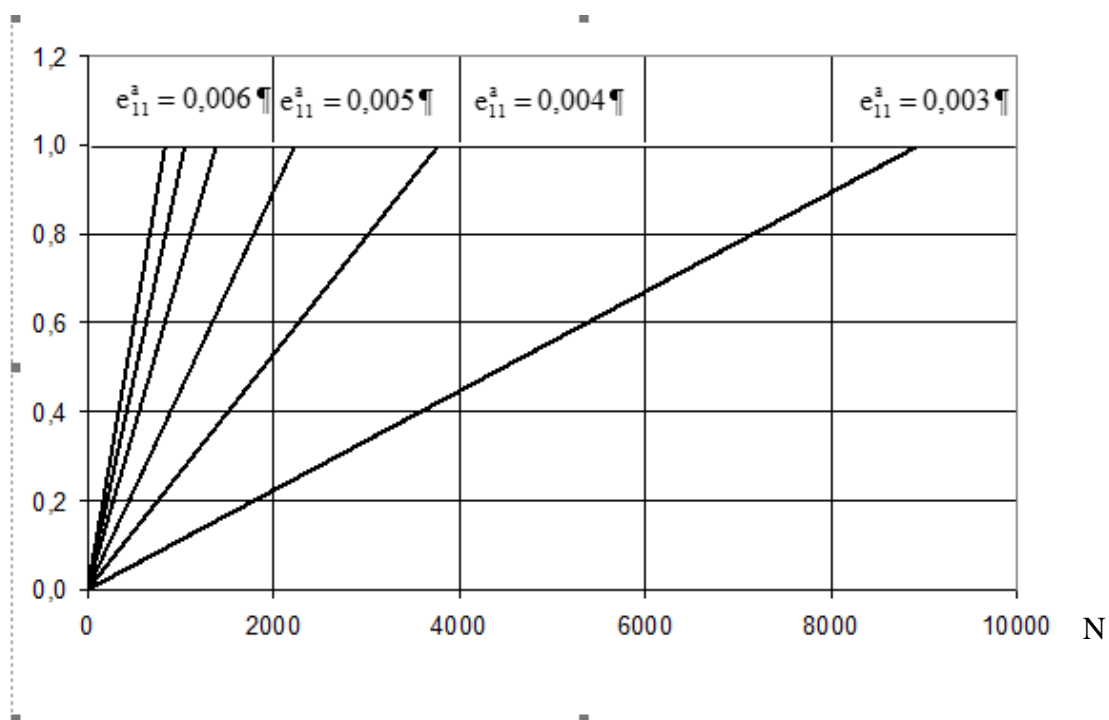


Рис. 6. Графики накопления усталостных повреждений при $\alpha=0, r=0, W_a=0$ для различных амплитуд полных деформаций $\epsilon_{11}=0,003 \div 0,008$

Поврежденность ω

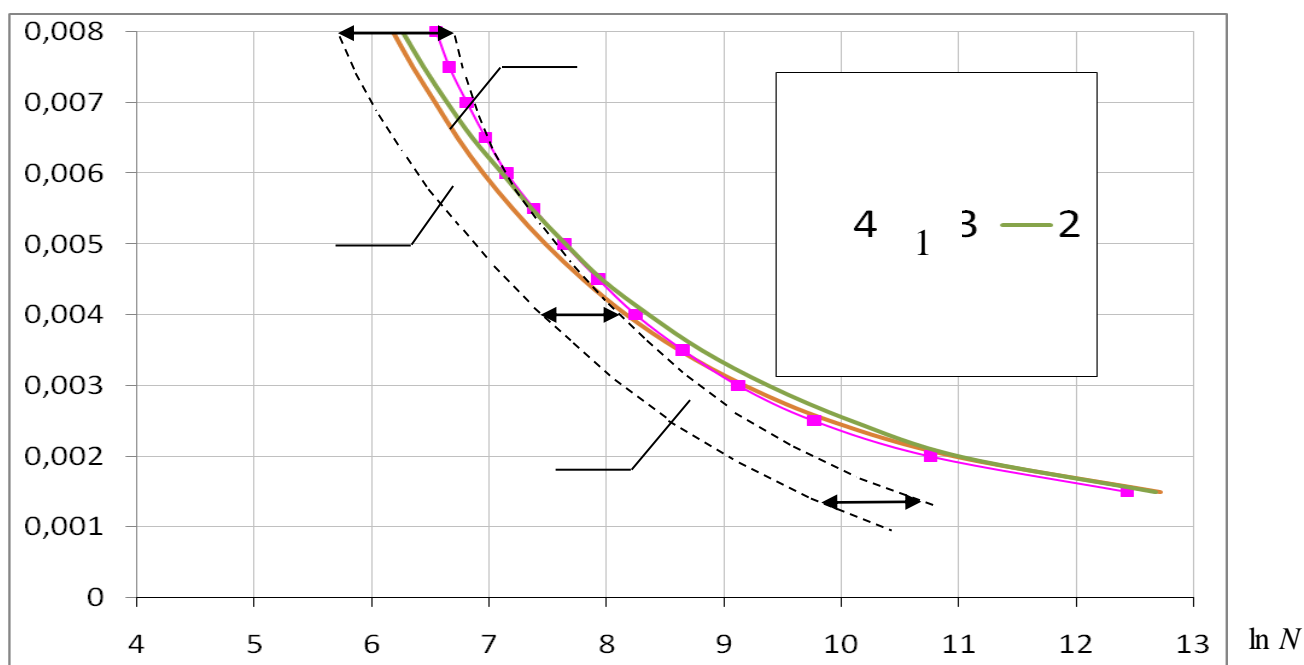


Рис. 7. Расчетные кривые усталости материала 08X18H10T

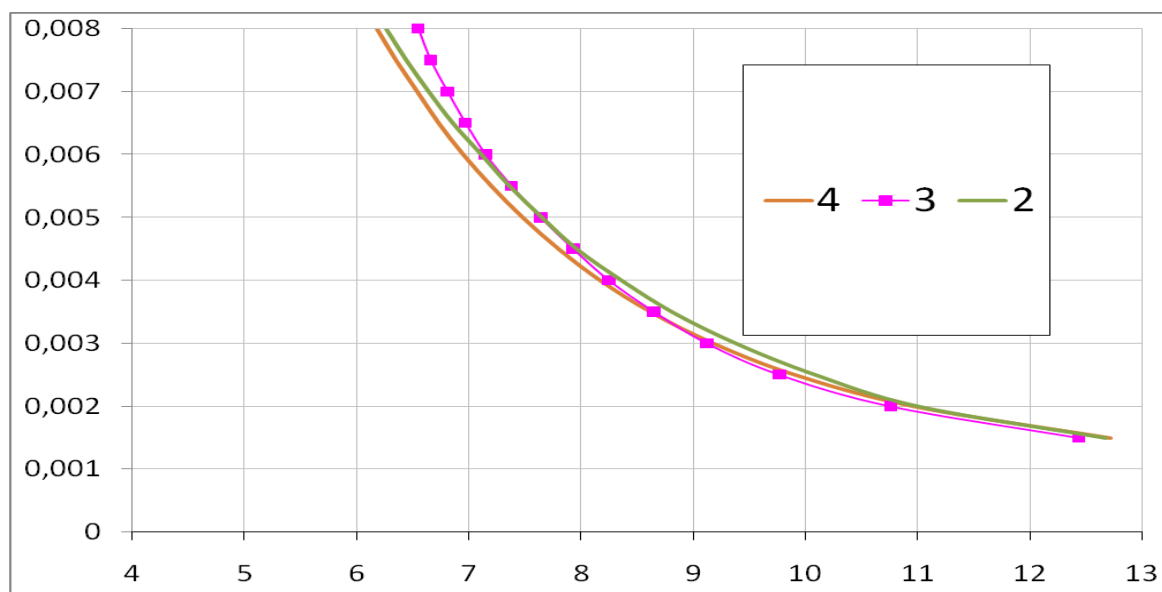


Рис. 8. Расчетные кривые усталости материала 08X18H10T, построенные:

- а) в соответствии с требованиями «Норм расчета на прочность...»
(линейное суммирование повреждений (кривая 1));
б) по программе «Ресурс-НН» (линейное суммирование повреждений, кривая 2);
в) по программе «Ресурс-НН» (нелинейное суммирование повреждений, кривая 3).

На рис. 3 показаны аналогичные графики накопления усталостных повреждений, полученные для «базовой» точки экспериментальной усталостной кривой для различных значений r при $\alpha = 1$ и $Wa \neq 0$. Расчет проводился при амплитуде деформации $\Delta e_{11}^a = 0,00535$ ($\Delta e_u^p = 0,004$). Из графиков видно, что если имеется экспериментальная кривая накопления усталостных повреждений, полученная при данной амплитуде деформаций в цикле, то параметр r определяется однозначно.

На рис. 4 приведены графики накопления усталостных повреждений при значениях параметров $\alpha=1$, $r=0,3$, $Wa \neq 0$ для различных амплитуд полных деформаций $\Delta e_{11}^a = 0,003 \div 0,008$. Значения данных параметров модели для материала 08X18H10T взяты из [2]. Расчеты проводились при $a_1 = a_2 = 3,54$. Из рис. 4 видно, что при данных значениях параметров накопление усталостных повреждений осуществляется по нелинейному закону.

На рис. 5 приведены аналогичные графики накопления усталостных повреждений при значениях параметров $\alpha=0$, $r=0$, $Wa \neq 0$, для различных амплитуд полных деформаций $\Delta e_{11}^a = 0,003 \div 0,008$. Расчеты проводились при $a_1 = a_2 = 2,094$. Видно, что при данных значениях параметров модели по окончании первой стадии накопления микропор дальнейшее накопление усталостных повреждений осуществляется по линейному закону.

Сопоставление кривых накопления усталостных повреждений на рис. 4 и 5 показывает, что параметры α и r не оказывают влияния на окончательную расчетную долговечность образца при одноосном растяжении-сжатии, но влияют на темпы накопления повреждений на второй стадии процесса, т.е. в диапазоне от N_a до N_f .

На рис. 6 приведены графики накопления усталостных повреждений при значениях параметров $\alpha=0$, $r=0$, $Wa=0$, для различных амплитуд полных деформаций $\Delta e_{11}^a = 0,003 \div 0,008$. Расчеты проводились при $a_1 = a_2 = 1,6165$. Видно, что при данных значениях параметров модели отсутствует первая стадия накопления повреждений, накопление усталостных повреждений осуществляется из начала координат по линейному закону.

На рис. 8 приведены три кривые усталости материала 08X18H10T, построенные расчетным путем по методу «дождя» и по программе «Ресурс-НН»:

1 – кривая усталости материала 08X18H10T, построенная по методу «дождя» в соответствии с требованиями «Норм расчета на прочность...» с использованием правила линейного суммирования повреждений (значения амплитуд условно-упругих напряжений приближенно вычислялись по формуле $\Delta\sigma_{11}^a = E \cdot \Delta e_{11}^a$, где E – модуль упругости материала 08X18H10T при $T=20^\circ\text{C}$. $E = 2,05 \cdot 10^6$ МПа).

2 – кривая усталости материала 08X18H10T, построенная по программе «Ресурс-НН» с использованием следующих значений параметров модели $\alpha=0$, $r=0$, $W_a=0$ (линейное суммирование повреждений);

3 – кривая усталости материала 08X18H10T, построенная по программе «Ресурс-НН» с использованием следующих параметров модели $\alpha=1$, $r=0,3$, $W_a \neq 0$ (нелинейное суммирование повреждений).

Стрелками обозначена ширина области разброса экспериментальных данных.

Приведенная на рис. 8 расчетная кривая усталости материала 08X18H10T (кривая 3), построенная по программе «Ресурс-НН» с использованием параметров модели $\alpha=1$, $r=0,3$, $W_a \neq 0$ (нелинейное суммирование повреждений), с высокой степенью точности описывает экспериментальную кривую усталости для данного материала [2]. При этом усталостная кривая, построенная по программе «Ресурс-НН» с использованием параметров модели $\alpha = 0$, $r = 0$, $W_a \neq 0$ в точности повторяет данную кривую.

Приведенная на рис. 8 расчетная кривая усталости материала 08X18H10T (кривая 1), построенная по правилу «дождя» с использованием условно-упругих напряжений и линейного суммирования повреждений, также хорошо описывает экспериментальную усталостную кривую для данного материала и находится в области разброса экспериментальных данных.

Расчетная кривая усталости материала 08X18H10T (кривая 2), построенная по программе «Ресурс-НН» с использованием параметров модели накопления повреждений $\alpha=0$, $r=0$, $W_a=0$ (линейное суммирование повреждений), также находится в области разброса экспериментальных данных, но при этом располагается справа от расчетной кривой усталости, построенной по правилу «дождя» (кривая 1). Это свидетельствует о том, что применение условно-упругих напряжений для анализа накопления повреждений приводит к более консервативным результатам.

Заключение

Разработанная математическая модель имеет три существенных отличия по сравнению с нормативным методом оценки накопленной поврежденности. Во-первых, в отличие от правила «дождя», применяемого в нормативном подходе, используется фактическая модель эксплуатации (фактическая последовательность режимов нагружения). Во-вторых, в отличие от условно-упругих напряжений, в разработанной математической модели используются фактические значения напряжений и деформаций в цикле нагружения, определяемые по модели неизотермического упругопластического деформирования. В-третьих, в отличие от нормативного подхода, в котором накопленная поврежденность рассчитывается как отношение текущего числа циклов (отработанного числа циклов) к общему числу циклов нагружения до разрушения материала, в разработанной математической модели используется физическая мера поврежденности материала (относительная объемная доля дефектов). Таким образом, данная модель позволяет учесть большее число фактических нагружающих факторов по сравнению с нормативным подходом. Это позволяет сделать следующий основной вывод. Разработанную математическую модель можно использовать в качестве метода, альтернативного нормативному методу для оценки поврежденности конструкционных материалов оборудования и систем ЯЭУ.

Библиографический список

1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПН АЭ Г-7-002-86) / Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
2. **Митенков, Ф.М.** Методы обоснования ресурса ЯЭУ / Ф.М. Митенков, В.Б. Кайдалов, Ю.Г. Коротких, В.А. Панов, С.Н. Пичков. – М.: Машиностроение, 2007. – 445 с.
3. **Бакиров, М.Б.** Безобразовая неразрушающая оценка старения металла оборудования и трубопроводов АЭС после длительных сроков эксплуатации / М.Б. Бакиров, В.В. Потапов, И.Ю. Забрусков // Протокол 19-го заседания рабочей группы по модернизации АЭС. Пльзень, Чехия, 2-7 дек. 2000.
4. **Леметр, Ж.** Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластичных материалов // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1985. – Т. 107, – № 1. – С. 90-97.
5. **Волков, И.А.** Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями / И.А. Волков, Ю.Г. Коротких. – М.: Физматлит, 2008. – 424 с.
6. **Банкрутенко, В.В.** 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, вып.75(3), изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2013. – С. 238-244.
7. **Можаровский, Н.С.** Долговечность конструкционных материалов при непропорциональных путях малоциклового нагружения / Н.С. Можаровский, С.И. Шукаев. // Проблемы прочности. – №10. – 1988. – С. 47-54.
8. **Savalle, S.** Microanureage, micropropagation et endommagement / S. Savalle, G. Caietand // La Recherche Aerospaciale, 1982, №6, p.395-411.

Дата поступления

в редакцию: 18.12.2019

A.V. Kozin¹, D.A. Lapshin¹, V.A. Panov¹, V.A. Pakhomov¹, M.A. Legchanov¹

DEFINITION OF PARAMETERS FOR MATHEMATICAL MODEL OF THE ACCUMULATED DAMAGE IN STRUCTURAL MATERIALS OF NPP EQUIPMENT

Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering¹
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹

Purpose: Development of calculation-experimental methodology for justification of the parameters selection for the mathematical model of fatigue damage accumulation in structural materials and equipment of NPP under nonstationary thermal mechanical stresses.

Technology/approach: The technology of the specified task solution is based on application of the method in which calculation results of the damage accumulation processes received by numerical techniques using certified software applications are compared with the results of experimental studies and with the results of other authors.

Mathematical models: Calculation study of the damage accumulation processes in the structural materials of equipment and systems uses the mathematical model of the damaged medium mechanics in when damage is measured as volume ratio of defects in some elementary volume of the material.

Justification: Numeric calculation results of the fatigue damage accumulation processes in the material of the laboratory samples under uniaxial stress-strain are confirmed by the results of experimental studies.

Findings: The performed studies verified the technology used to define the parameters of the mathematical model of fatigue damage accumulation in the structural materials of NPP equipment and systems under nonstationary thermal mechanical stresses.

Key words: mathematical model, model parameters, structural material, linear summarizing of damages, non-linear summarizing of damages, fatigue curve, NPP lifetime.