DOI: 10.18411/vntr2024-172-2

УДК 539.43

ПОВРЕЖДЕННОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СЛОЖНЫХ РЕЖИМАХ ДЛИТЕЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ

© Леонид Иванович Огородов [1], Вероника Андреевна Шапкина [2]
[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия
l.ogorodov@mail.ru
[2] Вологодский государственный университет, Россия
vrnk@bk.ru

Аннотация. *Приводится обзор кинетических уравнений повреждений и результатов расчета меры повреждений в сталях и сплавах (ЭИ-182, ЭИ-765, ЭИ-607А, ЭИ-893ВД, ЭИ-893, 800 Н) при нестационарных режимах нагружения в условиях сложного напряженного состояния и высоких температур от 525°С до 900°С. Целью работы является привлечение экспериментальных данных к оценке эффективности предложенных уравнений повреждений. Представлены результаты расчета меры повреждений при сложных режимах длительного нагружения стали 15Х1М1Ф, сплава ОХ13 и меди. Выделяются наиболее эффективные для описания процесса повреждений кинетические уравнения.*
Ключевые слова: *стали, сплавы, медь, нестационарные режимы, разрушение, уравнения повреждений, мера повреждений.*

DAMAGE TO STRUCTURAL MATERIALS UNDER COMPLEX LONG-TERM LOADING CONDITIONS

© Ogorodov L.I. [1], Shapkina V.A. [2]
[1] Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia
l.ogorodov@mail.ru
[2] Vologda State University, Russia
vrnk@bk.ru

Abstract. *The review of kinetic equations of damages and results of calculation of the measure of damages in steels and alloys (ЭИ-182, ЭИ-765, ЭИ-607А, ЭИ-893ВД, ЭИ-893, 800 N) under nonstationary loading conditions under complex stress conditions and high temperatures from 525 °C to 900 ° C. The aim of the work is to attract experimental data to evaluate the effectiveness of the proposed damage equations. The results of calculating the damage measure under difficult long-term loading conditions of steel 15Х1М1Ф, alloy ОХ13 and copper are presented. The kinetic equations that are most effective for describing the damage process are distinguished.*
Key words: *steels, alloys, copper, non-stationary modes, destruction, damage equations, damage measure.*

Введение. При проектировании элементов конструкций для обеспечения их оптимальной работы с максимальным механическим ресурсом важную роль играют расчеты усталостной и длительной прочности в части выбора материала. В сложных условиях эксплуатации эффективность работы материала и конструкции зависит от возможности длительного сопротивления в нестационарных режимах (колебания температур, нагрузок).

Наметилась тенденция к экономному использованию материалов в силовых элементах конструкций. Это может достигаться за счет того, что изделия и элементы конструкций будут надежно эксплуатироваться в течение более длительного времени, чем раньше. Необходимо исключить возможности повреждения конструкций вследствие недостаточной точности расчетов и прогнозирования долговечности.

В практике расчета проектирования долговечности всегда имелись и имеются некоторые сложности, поскольку при эксплуатации конструкций в них происходят достаточно непростые процессы длительного разрушения. Как оказалось, при сложных режимах эксплуатации хорошо изученные в условиях кратковременных режимов испытаний механические характеристики материалов не в полной мере удовлетворяют адекватному расчету работоспособности материалов и прогнозирования.

В настоящее время имеется большое количество работ, в которых предлагаются методы суммирования повреждений, критерии длительного разрушения, рекомендации в оценке долговечности. При этом очевидно, что более адекватным действительности по отношению к длительному разрушению является кинетический подход. Таким образом, длительное разрушение исследуется как процесс временной и описывается кинетическими уравнениями повреждений. В силу сложности процессов разрушения модели накопления повреждений в них могут рассматриваться как приближенные, при этом результаты расчетов по приближенным моделям с данными непосредственных экспериментов находятся в удовлетворительном согласии.

Задачи работы: 1. Выполнить обзор кинетических уравнений повреждений, использующихся в настоящей работе; 2. Привести обзор результатов расчета меры повреждений в сталях и сплавах при сложных режимах длительного нестационарного нагружения; 3. Представить новые результаты расчетов меры повреждений в ряде материалов при длительном нагружении.

Механические модели разрушения и кинетические уравнения повреждений. Процесс разрушения материалов, а также элементов конструкций включает в себя некоторые стадии, а именно – стадию рассеянных и стадию локальных повреждений, и для его описания нужно иметь уравнения повреждений, относящихся к данным стадиям. Помимо этого, требуется установление условия, при котором завершится первая стадия, и начнется вторая. К завершению второй стадии произойдет разрушение. Длительная прочность до сих пор, как правило, оценивается при исследовании стадии рассеянных повреждений, либо рассматривается стадия локальных. Среди моделей длительного разрушения можно выделить три основных феноменологических типа – деформационные, силовые и энергетические. Но в данных моделях одновременно могут происходить несколько процессов разрушений, которые могут взаимодействовать между собой либо накладываться друг на друга, поэтому в этих случаях необходимо применять комбинированные уравнения повреждений.

Мера повреждений выражается в форме некоторого инварианта тензора повреждений [1]

$$\Pi = \Pi_i + c\Pi_0, \quad (1)$$

где $\Pi_i = \sqrt{(2/3)\sum \Pi_{ij}^2}$ – интенсивность повреждений, Π_{ij} – компоненты девиатора, Π_0 – компоненты шарового тензора повреждений, c – экспериментально определяемая постоянная.

Для определения текущего значения $\Pi(\tau)$ в (1) требуются дифференциальные или интегральные уравнения, устанавливающие зависимость искомой величины от режима нагружения. Например, для случая линейного напряженного состояния дифференциальное уравнение силового типа можно представить в виде

$$d\Pi/d\tau = f[\sigma(\tau), \dot{\sigma}(\tau), \Pi(\tau), T(\tau), C(\tau), \tau], \quad (2)$$

где τ – время, $\sigma(\tau)$ – режим силового нагружения, $\dot{\sigma}(\tau)$ – скорость нагружения, $\Pi(\tau)$ – поврежденность материала, накопленная к моменту (τ), $T(\tau)$ – заданный температурный режим, $C(\tau)$ – параметр, характеризующий вид агрессивной среды.

Для случая сложного напряженного состояния уравнение линейного суммирования повреждений силового типа записывается в скалярной форме

$$\Pi_Б = \int_0^\tau \frac{d\theta}{\xi[\sigma_э(\theta, T, C)]}, \quad (3)$$

где ξ – время до разрушения при соответствующем эквивалентном напряжении $\sigma_э$ в условиях стационарного нагружения.

При нестационарном режиме нагружения интеграл превращается в сумму

$$\Pi_Б = \sum_{k=1}^{n} \frac{\tau_к(T, C)}{\xi_к(T, C)}, \quad (4)$$

где ξ_k– время разрушения при режиме k-ой ступени. При использовании формулы (5) для аппроксимации кривой длительной (статической) прочности материала

$$\sigma_р = A - B\, lg\xi, \quad (5)$$

кинетическое уравнение (3) принимает вид

$$\Pi_Б = \int_0^\tau \frac{1}{A_0} exp \frac{\sigma_э(\theta, T, C)}{B_0} d\tau. \quad (6)$$

А согласно (4) имеем

$$\Pi_Б = \sum_{k=1}^{n} \frac{\tau_k}{A_0} exp \frac{\sigma_э(\theta, T, C)}{B_0}, \quad (7)$$

где $A_0 = 1/exp(2{,}303\, A/B), B_0 = B/2{,}303$.

Для оценки долговечности элементов конструкций в условиях высокотемпературной ползучести при наличии сложного напряженного состояния применяется также соотношение деформационного типа

$$\Pi_e = \int_0^\tau \frac{de_i^*}{e_{ip}^*(\sigma_э, T, C)}. \quad (8)$$

В формуле (8) параметр e_i^* – инвариант Одквиста, т.е. развернутая длина пути вязкопластического деформирования.

В целом ряде работ предлагаются и применяются уравнения нелинейного суммирования повреждений. Остановимся на уравнениях следующего вида:

$$\Pi = \int_0^{\tau} \frac{m\theta^{m-1}}{\xi^m[\sigma_э(\theta, T, C)]} d\theta, \quad (9)$$

$$\Pi = \gamma \int_0^{\tau} e^{\gamma\{\theta - \xi[\sigma_э(\theta,T,C)]\}} d\theta, \quad (10)$$

$$\Pi = \sum_{k=1}^{n} \left(\frac{\tau_k}{\xi_k}\right)^p, \quad (11)$$

$$\Pi = \sum_{k=1}^{n} e^{\beta(\tau_k - \xi_k)}, \quad (12)$$

$$\Pi = \frac{\sigma_э(\tau)}{\sigma_{э\,пр}} + \int_0^{\tau} \frac{1 - \frac{\sigma_э(\theta)}{\sigma_{э\,пр}}}{\xi[\sigma_э(\theta, T, C)]} d\theta, \quad (13)$$

В зависимости (9)-(12) входят постоянные β, m, γ, p, определяющиеся дополнительными базовыми опытами на нестационарные режимы нагружения при наличии кривой длительной прочности, полученной при стационарных режимах. При аппроксимации кривой длительной прочности зависимостью $\xi = qe^{-\alpha\sigma_э}$ уравнение (13) приводится к виду

$$\Pi = \frac{\sigma_э(\tau)}{\sigma_{э\,пр}} + \frac{1}{q}\int_0^{\tau} \left[1 - \frac{\sigma_э(\theta)}{\sigma_{э\,пр}}\right] e^{\alpha\sigma_э} d\theta, \quad (14)$$

а при нестационарном ступенчатом нагружении к виду

$$\Pi = \frac{\sigma_{эп}}{\sigma_{э\,пр}} + \frac{1}{q}\sum_{k=1}^{n} \left[1 - \frac{\sigma_э(\tau)}{\sigma_{э\,пр}}\right] e^{\alpha\sigma_э}\tau_k, \quad (15)$$

где $\sigma_{э\ пр}$ – истинное напряжение разрыва образца, определяемое из опыта [2], $\sigma_{эп}$ – напряжение на последней стадии.

В работе [3] в расчете меры поврежденности сплава 800 Н представлены силовые и деформационные уравнения линейного суммирования повреждений, а также комбинированные уравнения.

В оценке эффективности расчетов меры повреждений рассмотрим комбинированное уравнение [1]

$$\Pi = \frac{\overline{\sigma}_{max}(N)}{\overline{\sigma}_{пр}} + \sum_{k=1}^{N} \varphi\left(\frac{w_k}{w_p}\right) + \sum_{k=1}^{N} f\left(\frac{\Omega}{w_p}\right), \quad (16)$$

которое учитывает накопление односторонних вязкопластических деформаций до и после стабилизации петли гистерезиса, а также изменение самой петли. В (16) σ_{max} – максимальное напряжение на момент определения повреждений, $\sigma_{пр}$ – истинное сопротивление разрыву, Ω – работа одностороннего пластического деформирования в k-том цикле нагружения, w_k – работа циклического деформирования, w_p – предельная работа статического деформирования в эквивалентных температурных условиях нагружения. При этом функциональные параметры $\varphi(w/w_p)$ и $f(\Omega/w_p)$ определяются из испытаний на малоцикловую усталость в условиях линейного напряженного состояния. В условиях сложного напряженного состояния

величины w и Ω определяются как суммы их значений за цикл по всем компонентам девиатора напряжений.

Кинетическое уравнение повреждений при малоцикловой усталости записывается в виде

$$\Pi(N) = \frac{\sigma_{max}(N)}{\overline{\sigma_{\text{р}}}} + \sum_{k=1}^{N} \varphi(\varkappa_k, R_{\sigma k}), \tag{17}$$

где параметры $\varkappa_k$ и $R_{\sigma k}$ относятся к текущему к-му циклу; $\varphi(\varkappa_k, R_{\sigma k})$ – функциональный параметр уравнения, определяемый из опытных данных.

При стационарном режиме циклического нагружения

$$\Pi(N) = \frac{\sigma_{max}(N)}{\overline{\sigma_p}} + \varphi(\varkappa, R_\sigma) \cdot N. \tag{18}$$

При условии разрушения П=1 из (18) имеем соотношение $\varphi(\varkappa, R_\sigma) = \left(1 - \frac{\sigma_{max}}{\overline{\sigma_p}}\right) \cdot \frac{1}{N_p}$, которое рассматривается как уравнение усталостной кривой $R\sigma$=const. Из данного уравнения для конкретного материала при наличии соответствующих экспериментальных данных определяется функциональный параметр $\varphi(\varkappa, R_\sigma)$.

При циклическом нагружении кинетическое уравнение повреждений применяется в виде

$$\Pi = \int_0^N \widetilde{\sigma_{max}}\,(n) M(N-n)\mathrm{d}n, \tag{19}$$

где в качестве независимой переменной используется число циклов нагружения (обязательно целое) при постоянном коэффициенте асимметрии. При нестационарных режимах наряду с регулярными циклами существуют переходные циклы, разделяющие блоки регулярных. Разрушающее действие их не определено, поэтому числа циклов N и n должны быть достаточно большими. Переходные циклы в оценке общей поврежденности не учитываются при условии, что их число мало по сравнению с числом одинаковых регулярных циклов.

При влиянии среды на длительную прочность материала уравнение используется в виде

$$\Pi = \int_0^\tau \widetilde{\sigma_{\text{э}}}\,(\theta, k_s) K(\tau - \theta, k_s)\mathrm{d}\theta, \tag{20}$$

где k_s – параметр, характеризующий агрессивность среды.

При малоцикловом нагружении появляется возможность использования комбинированного уравнения повреждений, учитывающее повреждения статической и циклической усталости

$$\Pi = \Pi_{\text{ст}} + \Pi_{\text{ц}}. \tag{21}$$

В формуле (21) поврежденность П к моменту разрушения по-прежнему составляет П=1. В случае многоциклового нагружения может быть использовано уравнение

$$\Pi = \int_0^\tau \widetilde{\sigma_{\text{э}\,max}}\,(\theta) L(\tau - \theta)\mathrm{d}\theta, \tag{22}$$

где П – суммарная поврежденность статической и циклической усталости, $L(\tau - \theta)$ – функция влияния, определяемая по кривой усталости при данном коэффициенте асимметрии цикла изменения всех компонентов напряжений, данной частоте нагружения и температуре.

Для описания процесса диссеминированных повреждений в сталях и сплавах использовалось [2-8] кинетическое уравнение наследственного типа в скалярной форме

$$П = \int_0^{\tau} \widetilde{\sigma_э}(\theta) K(\tau - \theta) d\theta, \quad (23)$$

где $\widetilde{\sigma_э}(\theta)$ – режим изменения приведенного эквивалентного напряжения, $K(\tau - \theta)$ – функция влияния (ядро), определяется по уравнению статической усталости материала. Имея в наличии уравнение кривой длительной прочности и используя уравнение разрушения П=1, функция влияния определяется как $\frac{d}{d\xi}\left[\frac{1}{\sigma_р(\xi)}\right] = K(\xi)$, где $\xi = \tau - \theta$.

Наиболее часто встречающиеся на практике кривые длительной прочности аппроксимируют зависимостями, которые целесообразно представить в виде $\sigma_р = A' - B' lg\tau$, $lg\sigma_р = A'' - B'' lg\tau$. Эти зависимости можно обобщить в форме приведенного уравнения $\widetilde{\sigma_р} = A - B\, lg\, \tau$.

В работе [3] использовались следующие уравнения повреждений:

$$П = \int_0^{\tau} lg\, \sigma K(\tau - \theta) d\theta\,, \quad (24)$$

$$П = \frac{\sigma_{n-1} - \sigma_*}{\sigma_{пр}} + \int_0^{\tau} lg(\sigma - \sigma_*)\, K(\tau - \theta) d\theta, \quad (25)$$

где σ_*– напряжение, соответствующее пределу длительной прочности на базе испытаний, $\sigma_{пр}$ – напряжение, представляющее собой гипотетическое сопротивление «мгновенному» разрушению.

Расчетные значения меры повреждений по уравнениям (24) и (25) сравнивались с расчетами по силовым, деформационным уравнениям линейного и квазилинейного суммирования повреждений [9]. Формулы, используемые в [9] не приводим.

Комбинируя выражения для меры повреждений, можно получить более сложные соотношения [1]

$$П = \frac{\sigma(\tau)}{C} + \int_0^{\tau} \tilde{\sigma}(\theta)\, d\theta + \int_0^{\tau} \tilde{\sigma}(\theta)\, M(\tau - \theta) d\theta, \quad (26)$$

обладающие в части описания процесса длительного разрушения большой гибкостью. Сложность данного кинетического уравнения состоит в постоянных и функциональных параметрах, которые необходимо подбирать либо определять.

Примерами менее сложных кинетических уравнений накопления повреждений рассматривались следующие:

$$П = \frac{\sigma(\tau) - \sigma^*}{\sigma_р} + \int_0^{\tau} \tilde{\sigma}(\theta)\, K, \quad (27)$$

$$П = \sigma_р \frac{\sigma(\tau) - \sigma_о}{\sigma_р^*} + \int_0^{\tau} \tilde{\sigma}(\theta)\, K(\tau(\tau - \theta) d\theta - \theta) d\theta, \quad (28)$$

$$П = \sigma_р \frac{\sigma(\tau)}{\sigma_р^{**}} + \int_0^{\tau} \tilde{\sigma}(\theta)\, K(\tau - \theta) d\theta, \quad (29)$$

где σ^*, $\sigma_р$, $\sigma_о$, $\sigma_р^*$, $\sigma_р^{**}$ – размерные постоянные.

При различных способах аппроксимации кривой длительной прочности $\tilde{\sigma}$ определяется в виде $\tilde{\sigma} = \sigma - \sigma_о$ или $\tilde{\sigma} = lg\,(\sigma - \sigma_о)$.

В комбинированных соотношениях (27)-(29) первые слагаемые описывают необратимые повреждения при первом или, если есть разгрузка, последующем после разгрузки активном нагружении до заданного режимом уровня напряжений. Параметры σ^*, $\sigma_р$, $\sigma_о$, $\sigma_р^*$, $\sigma_р^{**}$ определяются по данным кратковременного нагружения ($\sigma_р$) и по результатам дополнительных (минимум двух) базовых опытов на нестационарное ступенчатое нагружение, где в одном опыте напряжение на второй ступени нагружения больше, чем на первой ступени, а в другом опыте наоборот, причем разница между величинами напряжений на ступенях должна быть задана существенной в соответствие с кривой длительной прочности материала. Могут быть использованы и более сложные нестационарные режимы базовых опытов, на расчеты (подбор) параметров усложняются за счет наследственной части (второе слагаемое) в (15)-(17) комбинированных соотношений.

В работе [10] использовались соотношения

$$П = \sum_{i=1}^{k} B_1^m \left[\left(\frac{\tau_i}{lg \frac{A_1}{\sigma_{э,i}}} \right)^m - \left(\frac{\tau_{i-1}}{lg \frac{A_1}{\sigma_{э,i-1}}} \right)^m \right], \quad (30)$$

$$П = \frac{\sigma_{э\,max}}{\sigma_р} + \left(1 - \frac{\sigma_{э\,max}}{\sigma_р}\right) B_1^m \left[\left(\frac{\tau_i}{lg \frac{A_1}{\sigma_{э,i}}} \right)^m - \left(\frac{\tau_{i-1}}{lg \frac{A_1}{\sigma_{э,i-1}}} \right)^m \right], \quad (31)$$

где m=0,005.

Для расчета меры повреждений сплава ОХ13 [11] предлагается использовать аналог уравнений (27) и (28) в виде

$$П = \frac{\sigma_{э\,max} - \sigma_\tau}{\sigma_р} + \int_0^\tau (\sigma_э - \sigma_\tau) K(\tau - \theta) d\theta, \quad (32)$$

где σ_τ – напряжение, характеризующее предел длительной прочности (σ_τ=162 МПа, $\sigma_р$=650 МПа по данным [11]).

При кратковременных перегрузках вследствие наложения мгновеннопластических деформаций на вязкопластические деформации происходит взаимное влияние повреждений. При этих условиях приходится использовать формулу $П = П_1 + D П_1 П_2 + П_2$. Здесь $П_1$ - поврежденность, определяемая согласно (7) или, по нашему предложению, по уравнению (23); $П_2$ - поврежденность при мгновеннопластическом деформировании $П_2 = \frac{e_i^{МП}}{e_{iр}}$, где $e_i^{МП}$- интенсивность мгновеннопластической деформации, определяемая из опытов на быстрое нагружение и соответствующая полному разрушению материала при отсутствии ползучести либо ее крайне незначительного присутствия.

Для оценки эффективности применяемых уравнений повреждений теоретическое значение меры повреждений $П_Т$=1, которое должно было бы наблюдаться при идеальном описании процесса разрушения, сравнивается с расчетным значением на момент фактического разрушения материала (образца). В качестве функциональных параметров для различных типов уравнений повреждений используются следующие: в уравнениях деформационного типа – зависимость предельных деформаций, в уравнениях энергетических моделей – зависимость предельной работы пластического деформирования, отвечающие 50% вероятности разрушения, а в уравнениях силового типа используется кривая статической или циклической усталости. Таким образом, можно предположить, что при нестационарном

нагружении теоретическое условие $П_Т$=1 отвечает той же вероятности [1]. Эффективность анализируемых уравнений оценивается также величинами отклонений меры ΔП индивидуальных опытов от среднего значения меры повреждений для сопоставимых режимов нагружения.

Обзор ранее полученных результатов расчета меры повреждений в сталях и сплавах при сложных режимах длительного нагружения. В [5] представлены результаты расчета меры повреждений сталей ЭИ-182 (температура испытаний 525°С), ЭИ-765 (температура 800°С) и сплава ЭИ-607А (температура 700°С) при целом ряде сложных нестационарных режимах нагружения. В табл. 1 представлены результаты расчета меры повреждений при нестационарных режимах нагружения, в табл. 2 при знакопеременном нагружении по сравниваемым кинетическим уравнениям. Приводятся средние значения меры повреждений на момент разрушения материалов и предельные отклонения значений меры от среднего значения.

Таблица 1

Результаты расчета меры повреждений ЭИ-182 и ЭИ-765 при нестационарных режимах нагружения

Материал	Кол.	$П_Б$ (6)	$+ΔП_Б$	$-ΔП_Б$	П (23)	+ΔП	-ΔП
ЭИ-182	5	1,19	0,30	0,29	1,02	0,04	0,04
ЭИ-765	6	1,04	0,12	0,07	1,00	0,02	0,02

Таблица 2

Результаты расчета меры повреждений сталей ЭИ-182 и ЭИ-765 при знакопеременном нагружении

Материал	Кол. режимов	Условие	$П_Б$ (6)	$+ΔП_Б$	$-ΔП_Б$	П (23)	+ΔП	-ΔП
ЭИ-182 $\chi = 0{,}35$	3	$\sigma_э = 0$	0.84	0.08	0.09	0.88	0.02	0.03
		$\sigma_э = \chi\sigma_i$	0.86	0.08	0.09	0.98	0.02	0.01
ЭИ-765 $\chi = 0{,}40$	3	$\sigma_э = 0$	1.12	0.03	0.05	0.90	0.02	0.01
		$\sigma_э = \chi\sigma_i$	1.19	0.05	0.03	0.98	0.01	0.01

Здесь применили критерий Писаренко-Лебедева $\sigma_э = \varkappa\sigma_i + (1-\varkappa)\sigma_1$. В данном выражении $\varkappa$ - параметр, определенный по кривым длительной прочности при различных видах напряженного состояния, σ_i – интенсивность напряжений, σ_1 - наибольшее растягивающее главное напряжение. При сжатии, когда $\sigma_1<0$, эквивалентное напряжение можно определить по-разному. По первому подходу полагаем, что $\sigma_э = \varkappa\sigma_i$. Второй подход основан на предположении, что в условиях сжатия повреждения вообще не накапливаются, таким образом, эквивалентное напряжение равно нулю.

Результаты расчета меры повреждений на момент разрушения сплава ЭИ-607А при непропорциональных режимах нагружения (табл.3) и температуре 700°С (табл.4) показаны в условиях: одноосного напряженного состояния (I); знакопостоянного и знакопеременного двухосного напряженного состояния (II). В табл.5 показаны результаты расчета повреждений

сплава ЭИ-607А при знакопеременном нестационарном нагружении, а в табл. 6 - при малоцикловом знакопеременном нагружении при температуре 700°С [13].

Таблица 3

Результаты расчета меры повреждений ЭИ-607А при непропорциональных режимах нагружения

Материал	Кол. режимов	$П_Б$ [12]	$+\Delta П_Б$	$-\Delta П_Б$	$П_Б$	$+\Delta П_Б$	$-\Delta П_Б$	П (23)	$+\Delta П$	$-\Delta П$
I	5	0,99	0,02	0,03	0,98	0,07	0,05	1,02	0,04	0,04
II	5	1,02	0,03	0,07	1,04	0,12	0,05	1,06	0,03	0,02

Таблица 4

Результаты расчета меры повреждений ЭИ-607А при температуре 700°С

Материал	Кол. режимов	$П_Б$ [13]	$+\Delta П_Б$	$-\Delta П_Б$	$П_l$ [13]	$+\Delta П_l$	$-\Delta П_l$	П (23)	$+\Delta П$	$-\Delta П$
I	4	1.00	0.03	0.01	1.07	0.06	0.06	0.99	0.07	0.04
II	7	0.98	0.04	0.06	1.05	0.07	0.07	1.04	0.04	0.05

Таблица 5

Результаты расчета повреждений сплава ЭИ-607А при знакопеременном нестационарном нагружении [13]

Кол. режимов	$П_e$ [13]	$+\Delta П_e$	$-\Delta П_e$	П (23)	$+\Delta П$	$-\Delta П$	$П^{/}$ (23)	$+\Delta П^{/}$	$-\Delta П^{/}$
4	1,05	0,06	0,06	1,05	0,02	0,01	1,00	0,03	0,03

Здесь значения $П^{/}$ определены с учетом условия $\sigma_э=0$ при $\sigma_1<0$.

Таблица 6

Результаты расчета повреждений сплава ЭИ-607А при малоцикловом знакопеременном нагружении [13] при температуре 700°С

Кол. режимов	Кол. циклов	П [13]	$+\Delta П$	$-\Delta П$	П (23)	$+\Delta П$	$-\Delta П$
3	33;32;38	0,97	0,01	0,01	1,00	0,01	0,02

Далее приводим результаты расчета меры повреждений на момент разрушения трубчатых образцов сплава ЭИ-893ВД (обобщенные результаты) при нестационарных режимах статического нагружения на воздухе и в агрессивной среде (солевая нагрузка) и температуре 700°С [2]. В табл.7 показаны результаты при двухступенчатом нагружении (16 режимов), в табл.8 - при нестационарных режимах с промежуточными разгрузками и малоцикловых нагружениях (11 режимов).

Таблица 7

Результаты расчета меры повреждений сплава ЭИ-893ВД при двухступенчатом нагружении (16 режимов)

Показатели	Расчетные меры повреждений по уравнениям						
	3	9	10	11	12	14	20
$П_{ср}$	1,27	1,23	0,99	0,98	1,07	1,11	1,06
$+\Delta П$	0,27	0,37	0,08	0,28	0,38	0,12	0,13
$-\Delta П$	0,26	0,33	0,14	0,28	0,40	0,21	0,18

Таблица 8

Поврежденность сплава ЭИ-893ВД при нестационарных режимах с промежуточными разгрузками и малоцикловых нагружениях (11 режимов)

Показатели	Поврежденность по уравнениям		
	3	14	20
$П_{ср}$	0,91	0,88	0,89
$+\Delta П$	0,29	0,15	0,08
$-\Delta П$	0,47	0,19	0,08

В табл. 9 показаны итоги расчета диссеминированных повреждений сплава ЭИ-893 по уравнениям повреждений силового и энергетического типов [6-8]. Испытания проводились в условиях линейного напряженного состояния и температуре 800°С (8 нестационарных режимов мягкого циклического нагружения с частотами 3-5 и 0,25-0,45 циклов в минуту).

Таблица 9

Мера повреждений сплава ЭИ-893ВД

Показатели	Поврежденность по уравнениям			
	6	16	22	19
$П_{ср}$	0,83	1,00	1,00	1,00
$+\Delta П$	0,28	0,05	0,09	0,09
$-\Delta П$	0,21	0,06	0,12	0,09

В условиях плоского напряженного состояния расчетные значения $П_{ср}$ по уравнениям (6), (16) и (19) составили: 1,78; 1,07; 0,99, соответственно.

В [3] выполнена обработка экспериментальных данных работы [9]. В [9] исследовалась длительная прочность жаропрочного сплава 800 Н (*X*10*NiCrAlTi*32) в условиях стационарного нагружения, а также нестационарного (ступенчатого) изменения нагрузки. В материале создавалось одноосное напряженное состояние (растяжение) при температуре 800°С и 900°С. В табл.10 представлены результаты расчета меры повреждений при фактическом разрушении образцов сплава 800 Н в условиях ступенчатого (σ_I=20 МПа) нагружения (8 режимов) при температуре 900°С.

Таблица 10

Мера повреждений при фактическом разрушении образцов сплава 800 Н в условиях ступенчатого (σ_I=20 МПа) нагружения (8 режимов) при температуре 900°С

Показатели	Расчет авторов [9] по уравнениям						Уравнения	
	I	II	III	IV	V	VI	24	26
$П_{ср}$	0.72	0.93	1.18	1.07	0.84	0.95	1.06	1.09
$+\Delta П$	0.11	0.19	0.28	0.38	0.15	0.20	0.05	0.05
$-\Delta П$	0.19	0.24	0.21	0.27	0.21	0.22	0.04	0.04

В двух других циклах испытаний расчеты меры повреждений дали результаты по уравнению (24): $П_{ср}$=1,07; $+\Delta П$=0,03; $-\Delta П$=0,04; $П_{ср}$=1,00; $+\Delta П$ =0,05; $-\Delta П$=0,06, а по уравнениям (25) получили: $П_{ср}$ =1,02; $+\Delta П$ =0,03; =0,07; $П_{с}$=0,34; $+\Delta П$ =0,05; $-\Delta П$ 0,06.

Новые результаты расчета меры повреждений материалов. Перейдем к оценке поврежденности стали 15Х1М1Ф при нестационарном нагружении. В [14] испытания проводились при двух режимах циклического нагружения, характеристики которых представлены в табл.11. Температура во всех опытах была постоянной и равнялась 565°С,

что соответствует температуре эксплуатации стали. Длительность выдержки при максимальном напряжении цикла σ_{max} =160 МПа была равной 8 часам. Режимы (1) – (3) имитировали условия работы материала элемента конструкции при маневрировании мощностью энергоблока (σ_{min} =0,3$\sigma_{0,2}$= 60 МПа), причем время выдержки при частичной разгрузке составляло 8,16 и 24 часа соответственно. Режим (4) имитировал пуск и кратковременную (5 мин) остановку энергоблока. Для сопоставления в табл.11 приведены режимы нагружения, долговечность, характеристики длительной пластичности стали 15Х1М1Ф и результаты исследования транскристаллических сколов [14], относящиеся к стационарному режиму (5) нагружения (σ =160 МПа).

Таблица 11

Режимы нагружения, долговечность, характеристики длительной пластичности стали 15Х1М1Ф и результаты исследования транскристаллических сколов [14]

№ режима	Время разрушения, час	Число полных циклов N	Коэффициент асимметрии цикла, R	Отн. удлинение δ,%	Отн. сужение ψ, %	Число пор в единице V материала	Средний размер пор, мкм	Степень поврежденности границ зерен порами, %	Объемная доля пор, %	Доля пор в общем V повреждений	Доля трещин в общем V повреждений
1	744	46	0,375	29	86	-	-	-	-	-	-
2	1132	47	0,375	26	76	2,7-3,7	0,7-0,9	2,8-3,9	0,07-0,19	0,1-0,2	0,8-0,9
3	518	16	0,375	13	85	15,3-8,7	0,5-0,7	9,0-11,4	0,20-0,40	0,3-0,5	0,5-0,7
4	269	33	0,0	12	86	1,3-1,9	0,9-1,1	2,2-3,2	0,07-0,16	0,1-0,2	0,8-0,9
5	296	-	1,0	30	86	1,5-1,9	0,9-1,1	2,3-3,1	0,08-0,14	0,1-0,2	0,8-0,9

В настоящей работе определяются меры повреждений при разрушении стали 15Х1М1Ф в условиях нестационарного нагружения [14] с помощью кинетических уравнений силового типа (4) и (23). Получены коэффициенты кривой длительной прочности $\sigma_p = A - Blg\tau$ для стали 15Х1М1Ф в условиях одноосного растяжения при температуре 565°С, а именно А=616,3 МПа и В=75,7 МПа. Результаты расчета меры повреждений представлены в табл.12.

Таблица 12

Мера повреждений на момент разрушения стали 15Х1М1Ф по уравнениям (4) и (23)

Режим по табл.11	Мера повреждений	
	$П_Б$	П
1	1,34	1,01
2	1,43	1,02
3	0,53	0,85
4	0,91	0,98
$П_{ср}$	1,05	0,96
+ΔП	0,38	0,06
-ΔП	0,52	0,11

Имеется возможность сопоставить результаты работы [14] по оценке поврежденности стали 15Х1М1Ф физическими методами (оптический и растровой электронной микроскопии) с результатами расчета меры повреждений на основе феноменологических моделей длительного разрушения. Число пор в единице объема металла, средний размер пор и объемная доля пор при стационарном статическом (режим 5) и нестационарных малоцикловых (2) и (4) нагружениях близки, что соответствует значениям П. Механизм разрушения, связанный с зарождением и ростом пор по границам зерен, вносит существенный вклад в разрушение этой стали при испытании по режиму (3). Эта особенность разрушения отмечается кинетическими уравнениями. Уравнение (23) в этом случае более точно оценивает момент разрушения.

Для проверки эффективности предложенных кинетических уравнений (27) – (29) повреждений, использовались результаты испытаний в растворе $MgCl_2$ сталей 12Х18Н12М3ТЛ (1) и 0,5Х18АН6М2ФЛ (2) до разрушения при двухступенчатом нагружении в условиях линейного напряженного состояния при температуре 154°С. Результаты расчетов меры повреждений сталей представлены в табл.13 и 14.

Таблица 13

Результаты расчета меры повреждений в момент разрушения сталей 12Х18Н12М3ТЛ (1) и 0,5Х18АН6М2ФЛ (2) при двухступенчатом нагружении в среде 42% раствора хлористого магния при 154°С в условиях линейного напряженного состояния

Материал	Режим нагружения					Расчетная мера повреждений в момент разрушения по уравнениям					
	№	$\sigma_{(1)}$, МПа	$\tau_{(1)}$, мин	$\sigma_{(2)}$, МПа	$\tau_{(2)}$, мин	2-4	12	23	27	28	29
1	1	210	180	90	240	1,26	1,07	0,92	1,03	0,99	1,00
	2	210	180	90	120	1,19	1,07	0,91	1,03	0,99	1,00
2	1	210	240	90	240	1,55	1,10	0,90	1,00	0,96	1,00
	2	210	180	90	420	1,22	1,04	0,9	1,00	0,96	1,00
	3	90	1800	210	360	2,66	1,29	1,09	1,21	1,05	1,04
Среднее значение меры $П_{ср}$						1,58	1,11	0,94	1,05	0,99	1,01
Отклонение от среднего $+\Delta П$						1,08	0,18	0,15	0,16	0,06	0,03
Отклонение от среднего $-\Delta П$						0,39	0,07	0,04	0,06	0,03	0,01

Таблица 14

Результаты расчета меры повреждений в момент разрушения сталей 12Х18Н12М3ТЛ (1) и 0,5Х18АН6М2ФЛ (2) при двухступенчатом нагружении в условиях линейного напряженного состояния и действия среды

Мат-л	Режим нагружения					Расчетная мера повреждений в момент разрушения по уравнениям				
	№	$\sigma_{(1)}$, МПа	$\tau_{(1)}$, мин	$\sigma_{(2)}$, МПа	$\tau_{(2)}$, мин	2-4	23	27	28	29
1	1	210	180	90	2880	2,05	1,02	0,98	1,05	1,05
	2	210	180	90	1080	1,26	0,96	0,91	1,00	1,00
	3	210	180	90	900	1,18	0,94	0,91	1,00	0,99
	4	90	1980	210	40	1,04	1,13	1,10	1,07	1,04
	5	90	1140	210	78	0,84	1,10	1,09	1,05	1,02

Мат-л	Режим нагружения					Расчетная мера повреждений в момент разрушения по уравнениям				
	№	$\sigma_{(1)}$, МПа	$\tau_{(1)}$, мин	$\sigma_{(2)}$, МПа	$\tau_{(2)}$, мин	2-4	23	27	28	29
	6	90	1140	210	90	0,90	1,10	1,09	1,06	1,02
Среднее значение меры $П_{ср}$						1,21	1,04	1,01	1,04	1,03
Отклонение от среднего +ΔП						0,84	0,09	0,09	0,03	0,02
Отклонение от среднего -ΔП						0,37	0,10	0,10	0,04	0,04
2	1	210	240	90	180	0,68	0,86	1,00	0,94	0,99
	2	210	180	90	1110	0,74	0,92	1,01	0,97	1,03
	3	90	1800	210	390	1,46	1,11	1,20	1,02	1,02
	4	90	1800	210	1080	3,28	1,14	1,24	1,06	1,06
Среднее значение меры $П_{ср}$						1,54	1,01	1,11	1,00	1,02
Отклонение от среднего +ΔП						1,74	0,13	0,13	0,06	0,04
Отклонение от среднего -ΔП						0,86	0,15	0,11	0,06	0,03

Далее сопоставляются результаты расчета меры повреждений на момент разрушения сплава ОХ13 при нестационарных режимах нагружения [11] (одновременное длительное воздействие объемного напряженного состояния в элементе материала тонкостенного образца, коррозионной среды 0,3% раствора *NaCl* и температуры 350°С). В результате опытов на стационарное статическое нагружение получено [11] уравнение длительной прочности $\tau_p = exp(A - B\sigma_э)$, где $\sigma_э$ – эквивалентное напряжение по теории наибольших касательных напряжений (в МПа), τ- время (в секундах). Для расчета меры повреждений на момент разрушения сплава ОХ13 использовалось уравнение линейного суммирования повреждений (3), причем ступенчатый режим нагружения заменялся гладким режимом нагружения с возрастающим значением эквивалентного нагружения ($\sigma_э = \sigma_э^0 + k\tau$).

В [10] была предпринята обработка этих экспериментальных данных. Получено уравнение кривой длительной прочности в координатах $lg\sigma_э = A_1 - B_1\tau$. Для расчетов использовались уравнения (4) и (30), (31). Расчетные значения меры поврежденностей сплава ОХ13 на момент разрушения при нестационарных режимах нагружения [11] при температуре 350°С в объемном напряженном состоянии приведены в табл. 15.

Использование в качестве параметра уравнения повреждений уравнение кривой длительной прочности в виде $lg\sigma_э = A_1 - B_1\tau$ приводит практически нестационарные режимы к квазистатическим режимам нагружения, что и обеспечивает хороший результат в расчете меры поврежденности, но существенно ограничивает применение кинетических уравнений с этим функциональным параметром.

Расчетные значения меры повреждений П по уравнениям (13) и (32) для режимов нагружения с меньшей скоростью догрузки (время пребывания сплава под нагрузкой в среде 0,3% раствора *NaCl* при 350°С до разрушения в четыре раза больше, чем в других рассматриваемых режимах) меньше единицы. Этот факт можно объяснить тем, что имеет место накопление дополнительных рассеянных по поверхности образцов повреждений коррозионного воздействия, что косвенно отмечалось в [10,11,15]. В [15] уравнение длительной прочности сплава ОХ13 получено в виде $\tau_p = \beta l^{-\alpha\sigma}$, а поврежденность при ступенчатом нагружении определялась по уравнениям (11) и (13).

Обработкой результатов опытов работы [11] получено уравнение кривой длительной прочности сплава ОХ13 50% вероятность разрушения $\sigma_э = 1365,67 - 171,84lg\tau$ (в диапазоне напряжений от 162 МПа до 400 МПа).

Таблица 15

Результаты расчета повреждений сплавов ОХ13, О1Х13 при температуре 350°С в объемном напряженном состоянии в условиях нестационарного нагружения

Режим нагружения с догружением	№ режима	Число ступеней	Расчетная поврежденность в момент фактического разрушения по кинетическим уравнениям								
			3 [11]	4 [10]	30 [10]	31 [10]	11 [15]	13 [15]	3	20	32
1 МПа в сутки	1	25	1,45	0,89	1,01	1,05	0,77	1,01	1,40	1,24	1,00
	2	26		1,04	1,01	1,06	0,85	1,03	1,57	1,28	1,04
	3	27		1,15	1,01	1,08	0,93	1,05	1,77	1,32	1,09
1МПа в неделю	1	12	2,02	0,82	1,00	0,91	0,69	0,78	1,34	1,23	0,54
	2	18		0,98	1,01	1,11	1,49	1,03	3,46	1,73	0,96
	3	14		0,93	1,01	1,00	1,00	0,87	2,30	1,48	0,76
Среднее значение			1,74	0,97	1,01	1,03	0,95	0,96	1,97	1,38	0,90
Отклонение			-	0,18	0,00	0,08	0,54	0,09	1,49	0,35	0,19
Отклонение			-	0,15	0,01	0,12	0,26	0,18	0,63	0,14	0,36

В [16,17] приводятся оригинальные экспериментальные данные по усталостной прочности меди при плоском напряженном состоянии. С целью проверки применимости скалярной меры повреждений к оценке циклической долговечности меди в условиях двухлучевых взаимно ортогональных путей мягкого нагружения были поставлены эксперименты на тонкостенных трубчатых образцов отожженной меди [17]. Образцы получали в первой серии опытов пластическую вытяжку в осевом или тангенциальном направлении, а затем подвергались циклическому растяжению (частота 10 Гц, коэффициент асимметрии цикла 0,25, база испытаний 10^7 циклов) в направлении вытяжки до разрушения. Во второй серии опыты проводились в три этапа: сначала образец получал пластическую вытяжку, затем он подвергался циклическому растяжению в направлении вытяжки, а на заключительном этапе направление циклического растяжения изменяли на ортогональное. Опыт продолжался до разрушения.

По результатам опытов на статическое растяжение в осевом и тангенциальном направлении получена единая кривая деформирования в координатах истинных напряжений $\bar{\sigma}$ и деформаций $\bar{\varepsilon}$.

Из опытов на циклическую долговечность при растяжении в этих же направлениях (после пластической вытяжки) получено уравнение кривой усталости $\sigma = C - D\,lg\,N = 384,13 - 38,3\,lgN$ (C и D в МПа), отвечающее 50% вероятности разрушения. Доказана [16,17] высокая степень изотропии пластических и прочностных свойств меди.

Установлен [17] экспериментальный факт повышения циклической долговечности после предварительного циклического нагружения в ортогональном направлении (реализовывались два варианта перехода $\sigma_x \to \sigma_\varphi$ и $\sigma_\varphi \to \sigma_x$. Длительность предварительного нагружения N_1 имела величину, равную 0,1; 0,3; 0,5 и 0,7 от базовой долговечности $N_П$ по корреляционному уравнению кривой усталости. Напряжения $\overline{\sigma_x}$ и $\overline{\sigma_y}$ предварительной пластической вытяжки были на 10-20% выше, чем σ_x^{max} и σ_φ^{max} циклического нагружения ($\overline{\sigma}_x$ и $\overline{\sigma}_\varphi$ определялись по единой кривой деформирования).

Полученный экспериментальный материал позволил авторам [17] сделать вывод об ориентационном характере поврежденности. Механизм повышения сопротивления усталости при периодическом изменении вида напряженного состояния связывается [18] с особыми условиями накопления рассеянных дефектов. Указывается на возможность использования аналогичных предварительных режимов нагружения деталей и элементов конструкций в качестве тренировочных с целью существенного повышения сопротивления материала усталости.

Делается попытка описать процесс накопления повреждений в меди при помощи кинетических уравнений. Применяем тензор повреждений с главными компонентами (аналог уравнения (9)).

$$\Pi_x = \int_0^N \sigma_x^{max}(n) K(N-n)\mathrm{d}n, \tag{33}$$

$$\Pi_\varphi = \int_0^N \sigma_\varphi^{max}(n) K(N-n)\mathrm{d}n, \tag{34}$$

где ядро $K(N-n)$ определяется по усталостной кривой, отвечающей 50% вероятности разрушения

$$K(N-n) = \frac{D\,lg\,e}{(N-n)[C - D\,lg(N-n)]^2}. \tag{35}$$

При необходимости компоненты (33), (34) и ядро (35) могут быть выражены в функциях времени (22).

Интенсивность меры поврежденности определяется выражением

$$\Pi_i = \frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(\Pi_x - \Pi_\varphi)^2 + \Pi_x^2 + \Pi_\varphi^2}. \tag{36}$$

Разрушение должно наступать при достижении Π_x = 1 или Π_φ= 1, а также $\Pi_i = \sqrt{\Pi_x^2 - \Pi_x\Pi_\varphi + \Pi_\varphi^2} = 1$. Расчет значений Π_x, Π_φ и Π_i на момент фактического разрушения образцов меди при нестационарных режимах нагружения дает результаты больше, чем единица. Это указывает на то, что имеет место большая долговечность материала, чем предсказывает расчет по (33) – (36). Используя уравнение кривой усталости меди малой (~3%) и большой (~97%) вероятности разрушения в ядре (35), определена величина дисперсии $\Delta\Pi_i$ значений меры поврежденности Π_i, равную $\pm$0,082. Разрушение возможно при значениях $\Pi_i = 1 \pm 0{,}082$.

В табл. 16 приведены результаты расчета меры Π_i повреждений меди (средние значения) в зависимости от количества циклов предварительного нагружения N_1.

Таблица16

Средние значения меры повреждений Π_i на момент фактического разрушения меди в зависимости от длительности предварительного циклического нагружения

N_1	0	$0.1N_П$	$0.3N_П$	$0.5N_П$	$0.7N_П$
Кол. циклов	4	4	4	12	6
$\Pi_{i\,ср}$	1,112	1,156	1,207	1,470	1,195

По результатам расчета видно то, что предварительная пластическая вытяжка (при N_1 = 0 имеем $П_{i\ ср}$ =1,112) и предварительное циклическое нагружение оказывают влияние на процесс накопления повреждений материала на последней (основной) стадии нагружения.
Предлагается использовать для расчета меры повреждений меди комбинированное уравнение

$$П = П_\varepsilon - D(\alpha)П_\varepsilon П_i + П_i, \quad (37)$$

где $П_i$ – мера повреждений, определяемая по (33)-(36), $П_\varepsilon$ – поврежденность, рассчитываемая по уравнению деформационного типа

$$П_\varepsilon = \frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_р}. \quad (38)$$

Экспериментальный параметр $D(\alpha)$ учитывает взаимовлияние процессов накопления повреждений при пластической вытяжке и при последующем нагружении и зависит от вида напряженного состояния, при котором происходят деформационные процессы. В данном случае аргументом является угол между главными осями тензора напряжений при нестационарном нагружении [19].
В уравнении повреждений деформационного типа (38) под $\bar{\varepsilon}$ понимается истинная деформация пластической вытяжки, под $\bar{\varepsilon}_p$ – предельная истинная деформация материала. Уравнение (38) может быть обобщено в виде

$$П_\varepsilon = \frac{e_i}{e_{ip}}. \quad (39)$$

В формуле (39) используются интенсивности истинных напряжений. В данном случае $e_{ip} = \bar{\varepsilon}_р = 0{,}4$. Параметр $D(\alpha)$ при $\alpha = \pm\frac{\pi}{2}$ определен равным 1,1. Расчет (N_1 = 0) по комбинированному уравнению (37) дает результат $П_{ср}$=1,012.

Выводы и обсуждение. Обобщая вышеизложенное, сформулируем следующие выводы. В ходе исследования сопоставлены результаты расчета меры повреждений на момент разрушения ряда материалов в условиях сложного напряженного состояния при нестационарных режимах нагружения с использованием кинетических уравнений нелинейного, линейного, квазилинейного и наследственного типов, в том числе с применением комбинированных уравнений.
Преимущества в расчетах имеют нелинейные (10)–(12) и наследственные (20), (23) уравнения суммирования повреждений. Для режимов нагружения (табл.3–8) расчеты по (10)–(12) и (20), (23) меры повреждений на момент разрушения отличаются незначительно, что подтверждает применимость кинетических уравнений наследственного типа. В других случаях (табл. 1, 2, 12) уравнения наследственного типа (20) и (23) имеют преимущества.
Расчет (табл. 7 и 9) по комбинированным уравнениям (14) и (16) не дает преимуществ перед расчетом по уравнениям наследственного типа (19) и (20). По данным табл. 7 уравнение (20) дает лучший результат по сравнению с расчетом по уравнению (14).
Комбинированные уравнения (26), (28), (29), (32) и (33) повреждений, имеющие в своей структуре слагаемое наследственного типа, адекватно оценивают момент разрушения материалов при сложных режимах нагружений (табл. 10, 13-15).
В представленную работу положена квалификация кинетических уравнений по их соответствию модели разрушения – деформационной, силовой, или энергетической. Рассматриваются виды уравнений, которые удобны для их практического применения в инженерных расчетах на длительную прочность. Их эффективность оценивается с точки

зрения удобства определения экспериментальных параметров и правильности прогнозирования долговечностей при сложных и нестационарных режимах нагружения образцов или элементов конструкций. В целом ряде случаев приходится использовать комбинированные уравнения повреждений, построенные на одной и той же (силовой) модели длительного разрушения или на разных моделях, например деформационной и силовой. Расчеты меры повреждений в сталях и сплавах при нестационарных режимах длительного разрушения позволили выделить в данной работе наиболее приемлемые для практического применения кинетические уравнения. Следует также отметить, что кинетические уравнения наследственного типа успешно использовались в расчетах меры повреждений полимерных и композиционных материалов.

Список литературы

1. Павлов П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. - Л.: Машиностроение, 1988. - 252 с.
2. Огородов Л.И., Белов А.С. Экспериментальная проверка эффективности кинетических уравнений силового типа при описании длительного разрушения жаропрочного сплава в агрессивной среде в условиях нестационарного нагружения // Проблемы прочности. - 1995. - №3. - С. 19-27.
3. Курилович Н.Н., Огородов Л.И., Сараев Ю.В. Поврежденность сплава 800Н при нестационарном длительном нагружении // Весці Нацыянальной Акадэміі навук Беларусі. – 2001. - №2. – С. 5-9.
4. Курилович Н.Н., Огородов Л.И., Павлов П.А. Оценка накопления повреждений в сталях с помощью силовых уравнений наследственного типа // Весці Акадэміі Навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. - 1992. - №4. - С.34-39.
5. Огородов Л.И. Экспериментальная проверка применимости уравнений повреждений наследственного типа для оценки момента разрушения сталей и сплавов в условиях высокотемпературной ползучести при нестационарных режимах нагружения // Проблемы машиностроения и надежность машин. – 1996. - №4. - С. 98-107.
6. Огородов Л.И., Куранаков С.Я. Экспериментальная проверка применимости кинетического уравнения повреждений наследственного типа для расчета момента разрушения жаропрочного сплава в условиях ползучести // Вестник машиностроения. - 1995. - №10. - С. 26-28.
7. Куранаков С.Я., Огородов Л.И. Описание процесса разрушения жаропрочного сплава при малоцикловом нагружении и ползучести // Известия Томского политехнического университета. - 2005. - Т. 30, № 3. - С. 129-131.
8. Куранаков С.Я., Огородов Л.И. Расчетно-экспериментальная оценка долговечности жаропрочного сплава в условиях малоцикловой усталости и ползучести // Ползуновский вестник. - 2006. - № 4. - С. 269-274.
9. Buchmann E., Ennis P.Y., Schuster H., Nickel H. // Ber. Kernforschungsanlaga Yulich/ 1989. №2298. S.1-156.
10. Фан Ки Фунг. Коррозионно-механические повреждения и прочность стальных конструкционных элементов в агрессивных средах: автореф. дис. канд. техн. наук. - Л., 1985. - 20 с.
11. Исследование длительной коррозионной прочности сплава ОХ13 при объемном напряженном состоянии / И.Н. Изотов, Ю.Э. Хангу, Ю.Я. Логинов и др. // Прочность материалов и конструкций. Ползучесть и длительная прочность: сб. науч. тр. - Л.: ЛПИ, 1983. - С.31-34.

12. Бронз В.Х. Высокотемпературная ползучесть и длительное разрушение конструкционного сплава при сложном термомеханическом нагружении: автореф. дис. … канд. техн. наук. - Л., 1982. -18 с.
13. Новиков А.П. Высокотемпературная ползучесть и длительное разрушение жаропрочного сплава с учетом мгновенно пластического деформирования при сложных нестационарных режимах нагружения: автореф. дис.…канд. техн. наук. - Л., 1983. -18 с.
14. Смотрицкая Е.Г. Механизмы разрушения стали 15Х1М1Ф при ползучести в условиях циклического нагружения. - М., 1987. - 11с. – Деп. в Информэнерго 23.03.87., №2491 эн.
15. Борисевич В.В. Кинетика повреждений и оценка длительной прочности конструкционных сталей в жидких агрессивных средах: автореф. дис. канд. техн. наук. - Алма-Ата., 1987. - 20 с.
16. Логинов Ю.А., Шерстнев В.А. Усталостная прочность меди при плоском напряженном состоянии // Прочность материалов и конструкций. Ползучесть и длительная прочность: сб. науч. тр. №393. - Л.: ЛПИ, 1983. - С.20-23.
17. Логинов Ю.А., Шерстнев В.А. Об одной особенности сопротивления меди циклическому нагружению.- Л., 1986. - 19 с. – Деп. в ВИНИТИ №2242 – В 86.
18. Шерстнев В.А. Вихревое нагружение как возможный способ повышения циклической долговечности конструкционных материалов // Сб. докл. I-й Международной конф.: Научно-техн. проблемы прогнозирования надежности и долговечности. - СПб.: СПбГТУ, 1995. - С 252.
19. Огородов Л.И., Алексейцев А.И. Оценка поврежденности жаропрочного сплава в условиях высокотемпературной ползучести при нестационарных режимах нагружения с кратковременными перегрузками // Проблемы механики современных машин: материалы VII Междунар. науч. конф. Ч.1. - Улан-Удэ: Изд. ВСГУТУ, 2018. - С. 286-289.

Дата поступления: 25 февраля 2024 г.