

УДК 539.372

**Н. Н. Курилович, канд. техн. наук, доц., Л. Ф. Котягов,
Л. И. Огородов, канд. техн. наук, доц.**

ОЦЕНКА НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СТАЛЯХ ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ

Предлагаются кинетические уравнения силового типа для оценки меры повреждений при циклических и сложных режимах нагружений в условиях линейного и сложного напряженного состояний. При построении таких уравнений постоянные и функциональные параметры определяются на основании простейших опытов, а следовательно, обладают большей гибкостью при определении меры повреждений. Уравнения достаточно хорошо согласуются с опытами, проведенными в условиях сложного напряженного состояния и сложного нагружения.

Введение

Процесс разрушения элемента материала схематически разбивается, как правило, на две основные стадии: стадию развития повреждений рассеянных (диссеминированных) по множеству микроскопических объемов и стадию роста одной или ряда трещин, приводящих к разрушению сплошности тела и в дальнейшем к его полному разрушению. В зависимости от материала, условий термомеханического нагружения и характера напряженного состояния относительная продолжительность этих стадий и их общая продолжительность могут быть различными. В условиях образования микроскопических трещин перед фронтом каждой из них продолжают развиваться и накапливаться диссеминированные повреждения, носящие определенный локальный характер, причем стадия диссеминированных повреждений как в локальном объеме, так и в других объемах, сохранивших сплошность, может включать ряд последовательно протекающих процессов. Граница между стадией магистральной трещины обычно достаточно размыта. В условиях свободных деформаций и в отсутствии острых концентраторов напряжений стадия роста магистральной трещины непродолжительна по сравнению со стадией диссеминированных повреждений, и зачастую начало развития магистральной трещины практически совпадает с полным разрушением. Этот случай разрушения ха-

рактерен для элементов конструкций типа тонкостенных оболочек, труб, мембран и емкостей. В случае же стесненных деформаций, когда с появлением трещины усилия в элементе материала уменьшаются, вторая стадия может быть достаточно протяженной. Вторая стадия может быть также определяющей при условии стесненности деформаций, например, в зонах местных напряжений.

Постановка задачи исследований. Получение кинетических уравнений повреждений

Для описания процесса разрушения нужно располагать при возможности различными уравнениями повреждений, одно из которых относится к стадии рассеянных повреждений, другое – к стадии локальных повреждений. Кроме того, необходимо еще установить условие завершения первой и начала второй стадии, оканчивающейся полным разрушением тела при достижении трещинами их критических размеров. Однако в подавляющем большинстве случаев длительную прочность пока еще оценивают на основе рассмотрения либо только рассеянных, либо только стадии локальных повреждений. Феноменологическое описание стадии диссеминированных повреждений основывается на представлении о поврежденности, как об особом термомеханическом состоянии элемента сплошной среды.

Известны значительные трудности в оценке долговечности элементов конструкций, так как при их эксплуатации протекают сложные процессы длительного разрушения. К таким относят статическую усталость, возникающую в результате выдержки конструктивных элементов во времени под действием усилий, мало- и многоцикловую усталость, а также процессы поверхностных разрушений. При этом прочность элемента конструкции лимитируется предельным состоянием последней. Поэтому критерии предельного состояния в элементах конструкций могут быть различные. Такими критериями могут служить максимальные нагрузки, приводящие к разрушению, предельные остаточные деформации, время до разрушения или число циклов, возникновение трещин усталости или термоусталости, потеря устойчивости под действием силовых или тепловых нагрузок, предельный износ поверхностных слоев материала и т. д. Поэтому за критерии предельного состояния необходимо выбирать величину, характеризующую достижение предельного состояния. Имеет место значительное многообразие зависимостей, рекомендуемых для оценки механического состояния и долговечности материала. Общим является кинетический подход к явлениям деформирования и повреждений, допускающий феноменологическое описание с помощью некоторых определяющих уравнений, называемых уравнениями механических состояний и кинетическими уравнениями повреждений.

При построении уравнений состояний необходимо учитывать лишь основные факторы, влияющие на поведение материалов, причем постоянные и функциональные параметры этих уравнений для одних и тех же материалов в различных условиях эксплуатации могут быть различны.

Кинетические уравнения повреждений материалов отвечают, как правило, принципу линейного суммирования повреждений. В таких подходах процесс накопления повреждений описывается как-либо параметром интегрально, харак-

теризующим все факторы поврежденности без учета влияния отдельных из них на процесс накопления повреждений. С помощью уравнений повреждений могут описываться обе основные стадии длительного разрушения – стадия рассеянных повреждений и стадия развития макроскопических трещин. Постоянные и функциональные параметры в этих уравнениях определяются, как правило, на простых опытах. Эффективность предсказания долговечностей при сложных режимах нагружения таких уравнений сравнивается с экспериментальными данными.

Для проведения опытов использовано два конструктивных сплава ЭП-182 (20ХМ1Ф1ТР) и ЭИ-765 (ХН70ВМЮТ) как наиболее часто применяемые для изготовления деталей, работающих при высоких температурах. Температура испытаний для сплава ЭП-182 составляла 525 °С, для сплава ЭИ-765 – 800 °С. Образцы изготовлялись в виде тонкостенной трубки диаметром 20 мм, толщина стенки составляла 1 мм, длина рабочей части трубки – 60 мм. Истинная деформация образцов измерялась с помощью двух катетометров и определялась по известной формуле

$$\varepsilon = 2 \ln \frac{d_0}{d}, \quad (1)$$

где d_0 – диаметр образца в начале испытания; d – текущий диаметр образца в процессе деформирования.

Режимы циклического нагружения для сплава ЭП-182 показаны на рис. 1, а для сплава ЭИ-765 – на рис. 2. В случае знакопеременных режимов нагружения можно предполагать о наличии помимо статической усталости, еще и некоторой циклической усталости. Оценка меры повреждения статической усталости уравнениями силового типа предложена в [1] и имеет вид:

$$P = K_1 \frac{1}{C_0} \exp \frac{\sigma}{A_0} \cdot \theta_1, \quad (2)$$

где K_1 – число полуциклов растяжения; θ – продолжительность полуцикла растяжения; постоянные C_0 и A_0 легко определяются по кривым длительной прочности в

координатах σ , $\lg t$. Здесь t_i – время до разрушения при напряжении σ_i . Эти опыты проводятся при постоянном растяжении.

| Материал | Режим нагружения | Число циклов при разрушении | Π_1 | Π_2 |
|----------|---------------------------------|-----------------------------|---------|---------|
| ЭП-182 | <p>σ, МПа</p> | 70 | 0,748 | 0,2516 |
| ЭП-182 | <p>σ, МПа</p> | 42 | 0,8526 | 0,1474 |
| ЭП-182 | <p>σ, МПа</p> | 24 | 0,925 | 0,075 |

Рис. 1. Схема режимов нагружения и значения меры повреждений для сплава ЭП-182

В момент разрушения величина меры повреждений равна единице. Сначала рассмотрим лишь влияние статической усталости. Эта поврежденность накапливается за суммарное время пребывания материала под действием растягивающих напряжений. Данную поврежденность обозначим через Π_1 . Значения этой величины даны на

рис. 1 и 2, где приведены соответствующие режимы нагружения.

Будем полагать, что полная поврежденность Π к моменту разрушения по-прежнему равна единице. Можно предположить, что дополнительное повреждение в условиях знакопеременных режимов нагружения связано только с цик-

лической усталостью. Величины $P_2 = 1 - P_1$ также даны на рис. 1 и 2. Видно, что для материала ЭП-182 доля в общей поврежденности растет с уменьшением амплитуды симметричного цикла и с возрастанием числа циклов. Что касается материала ЭИ-765, то здесь долговечности в условии симметричного циклического нагружения оказались не меньшими, а даже не-

сколько большими, чем в условиях нагружения по отнулевому циклу с тем же размахом. Таким образом, периодический переход к сжимающим напряжениям в данном случае не приводит к разупрочнению, а, быть может, даже к некоторому упрочнению, где $P_2 = 0$.

| Материал | Режим нагружения | Число циклов при разрушении | P_1 | P_2 |
|----------|---|-----------------------------|-------|-------|
| ЭИ-765 | <p>Stress-strain diagram showing two loading cycles. The first cycle has a tensile peak of 180 MPa and a compressive trough of 180 MPa. The second cycle has a tensile peak of 180 MPa and a compressive trough of 380 MPa. The material is EI-765.</p> | 44 | 1,071 | – |
| ЭИ-765 | <p>Stress-strain diagram showing two loading cycles. The first cycle has a tensile peak of 180 MPa and a compressive trough of 180 MPa. The second cycle has a tensile peak of 180 MPa and a compressive trough of 400 MPa. The material is EI-765.</p> | 27 | 1,140 | – |
| ЭИ-765 | <p>Stress-strain diagram showing two loading cycles. The first cycle has a tensile peak of 180 MPa and a compressive trough of 180 MPa. The second cycle has a tensile peak of 180 MPa and a compressive trough of 420 MPa. The material is EI-765.</p> | 18 | 1,152 | – |

Рис. 2. Схема режимов нагружения и значения меры повреждений для сплава ЭИ-765

Построим кинетическое уравнение, описывающее зависимость повреждения от амплитуды напряжений σ_a и числа циклов N . Вариант данной зависимости имеет вид:

$$\frac{d\Pi}{dN} = F(\sigma_a), \quad (3)$$

где σ_a – амплитуда напряжений.

Наметим характер $F(\sigma_a)$. При симметричном цикле нагружения

$$\Pi_2 = 1 - \Pi_1 = F(\sigma_a) \cdot N$$

или

$$F(\sigma_a) = \frac{\Pi_2}{N}. \quad (4)$$

Полные повреждения, складывающиеся из статических повреждений с мерой Π_1 и циклических с мерой Π_2 , определяются как

$$d\Pi = \frac{1}{C_0} \exp \frac{\sigma}{A_0} d\theta + F(\sigma_a) dN. \quad (5)$$

В случае регулярного циклического режима нагружения это уравнение можно привести к одной независимой переменной N , после чего оно интегрируется. С этой целью вычисляется статическое повреждение за один цикл:

$$\Delta \Pi_1 = \frac{1}{C_0} \int \exp \frac{\sigma}{A_0} d\theta. \quad (6)$$

Величина Π_1 равна соответственно $\Delta \Pi_1 N$. Величина Π_2 равна в тех же условиях $F(\sigma_a) N$. Таким образом,

$$\Pi = N [\Delta \Pi_1 + F(\sigma_a)]. \quad (7)$$

В случае регулярного ступенчатого режима нагружения, слагающегося из r блоков, предыдущая зависимость обобщается следующим образом:

$$\Pi = \sum_{k=1}^r [N_k \Delta \Pi_{1k} + F(\sigma_{ak}) N_k], \quad (8)$$

где $\Delta \Pi_{1k}$ – приращение статических повреждений за один цикл в k -м блоке; N_k – число циклов в k -м блоке; $F(\sigma_{ak})$ – приращение циклической поврежденности за один цикл в том же блоке.

Уравнение (8) может принципиально претендовать на описание процесса повреждений и в условиях любого несимметричного знакопеременного цикла.

Установим возможность использования кинематического уравнения повреждений (2) для случая сложного напряженного состояния. В этом случае уравнение (2) может быть записано как

$$\frac{d\Pi_{ij}}{d\theta} = \sigma_{ij}(\theta); \quad \Pi_{ij} = \int_0^\theta \sigma_{ij}(\theta) d\theta, \quad (9)$$

где компоненты тензоры приведенных напряжений выражаются в виде

$$\sigma_{ij}(\theta) = \frac{3}{2} \cdot \frac{\delta_{ij}}{\sigma_i} \cdot f\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_*}\right) \times \varphi(\mu_s) \cdot \varphi(k_o) \cdot t_*^{-1}, \quad (10)$$

где $\varphi(\mu_s)$ – функция, учитывающая влияние коэффициента Лоде на скорость накопления повреждений; t_* – постоянная с размерностью времени.

Как известно,

$$\mu_s = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, \quad (11)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

В [5] мера повреждений выражается в форме инварианта тензора напряжений:

$$\Pi = \pi_i + C \pi_a; \quad (12)$$

$$\pi_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sum \pi_{ij}^2, \quad (13)$$

где π_i – интенсивность повреждений; π_{ij} – компоненты девиатора; π_a – компоненты шарового тензора повреждений; C – экспериментально определяемая величина.

Опыты в условиях сложного напряженного состояния (СНС) проводились на образцах указанных материалов на растяжение-сжатие и кручение одновременно. Образцы из обоих материалов выдерживались при различных уровнях напряжений длительное время вплоть до разрушения как в условиях линейного напряжен-

ного состояния ($\mu_s = -1$), так и плоского напряженного состояния ($\mu_s = -0,7$, $\mu_s = -0,39$).

На рис. 3, а (для сплава ЭП-182) и рис. 3, б (для сплава ЭИ-765) показаны кривые длительной прочности в этих условиях.

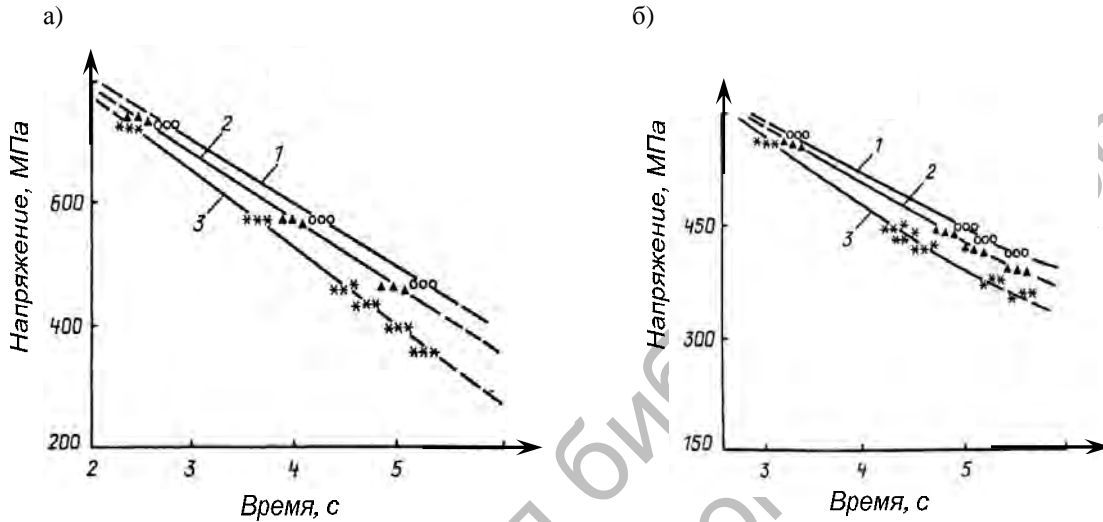


Рис. 3. Кривые длительности прочности сплавов ЭП-182 (а) и ЭИ-765 (б) при различных значениях коэффициента Пуассона: 1, 2, 3 – $\mu_s = -1; -0,7; -0,39$ соответственно

Легко убедиться, что наименьшей длительностью материалы обладают при простом растяжении-сжатии. При этом для материала ЭИ-765 имеется два участка. Постоянные $C_0 = 9,67 \cdot 10^8$ с, $A_0 = 46,79$ МПа, на втором участке $C_0 = 5,97 \cdot 10^9$ с, $A_0 = 33,63$ МПа. Применительно к каждому из материалов ЭП-182 и ЭИ-765 было рассмотрено три режима нестационарной ползучести при различных видах ступенчатого нагружения до момента разрушения. Кривые аппроксимировались следующим образом. Для сплава ЭИ-765 при линейном напряженном состоянии

$$\begin{aligned} \sigma &= 912 - 110,66 \lg \tau; \\ \sigma &= 757 - 776,49 \lg \tau. \end{aligned} \quad (14)$$

Для сплава ЭП-182

$$\sigma = 968 - 107,80 \lg \tau. \quad (15)$$

На основании экспериментальных данных, приведенных в [1–4], обобщим уравнение (2) на случай нестационарной ползучести в условиях одновременного действия нормального и касательного напряжений, предполагая его в дальнейшем в скалярной форме:

$$\frac{d\Pi}{d\tau} = F(\sigma_1, \sigma_0, M_s), \quad (16)$$

где σ_i – интенсивность напряжений.

Из литературы, посвященной предельному состоянию конструкционных материалов (например, [6]), известно, что вид девиатора напряжений отражается на условиях разрушения элемента материала в меньшей степени, чем величина и знак компонентов шарового тензора напряжений. Здесь возможен случай, когда поверхности предельных

главных напряжений стягиваются при трех главных растягивающих напряжениях в точку, отстоящую на конечное расстояние от начала координат. Учитывая данное обстоятельство, мы введем в уравнение (16) параметр σ_0 шаровой части тензора напряжений и тогда пренебрегаем параметром M_s . Обобщенное уравнение повреждений имеет следующий вид:

$$\frac{d\Pi}{d\tau} = f(\sigma_i) = \frac{1}{C_0} \psi \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_i} \right), \quad (17)$$

где $f(\sigma_i)$ представляется известным выражением

$$f(\sigma_i) = \frac{1}{C_0} \exp \frac{\sigma_i}{A_0}. \quad (18)$$

Условие разрушения запишется следующим образом:

$$1 = f(\sigma_i) \cdot \psi \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_i} \right) \cdot \tau_p. \quad (19)$$

Для определения вида функции ψ необходимо построить экспериментальный график зависимости величины $1/\tau_p f(\sigma_i)$ от величины отношений σ_0/σ_i . Экспериментальные зависимости аппроксимировались соответственно для сплавов ЭИ-765 и ЭП-182 следующими выражениями:

$$\psi \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_i} \right) = 7,80 \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_i} \right)^2 + 0,145; \quad (20)$$

$$\psi \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_i} \right) = 66,90 \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_i} \right)^4 + 0,175. \quad (21)$$

Эти выражения построены таким образом, что при линейном напряженном состоянии, когда соотношение σ_0/σ_i составляет 0,333, величина $\psi(\sigma_0/\sigma_i)$ обращается в единицу. В тех случаях, когда объем возможных опытов для построения ог-

раничен, можно для приближенного расчета аппроксимировать функцию линейным выражением вида

$$\psi \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_i} \right) = B \frac{\sigma_0}{\sigma_i} + K, \quad (22)$$

определяя B и K из двух опытов. Такими могут быть опыт на чистый сдвиг, из которого определяется величина $\psi(0) = K$, и опыт на растяжение, при котором

$$\psi(0,333) = B \cdot 0,333 + K = 1. \quad (23)$$

Эффективность построенного кинематического уравнения проверена по экспериментальным данным в [1–4] по разрушению при одновременном растяжении и кручении трубчатого образца в условиях нестационарной ползучести.

Режимы нагружения и результаты расчетов меры повреждений в момент разрушения приведены на рис. 4 и 5.

Расчетная величина меры повреждений колеблется от 0,982 до 1,040, что свидетельствует о возможности использования уравнения (17) при различных нестационарных режимах нагружения, включая и тот случай, когда пропорциональность изменения τ и σ нарушается.

Заключение

Предложенные кинетические уравнения повреждений силового типа обладают большей гибкостью в отношении того набора опытов, по которым определяются постоянные и функциональные параметры этих уравнений. Многочисленные экспериментальные данные, отображенные в работе, подтверждают это обстоятельство.

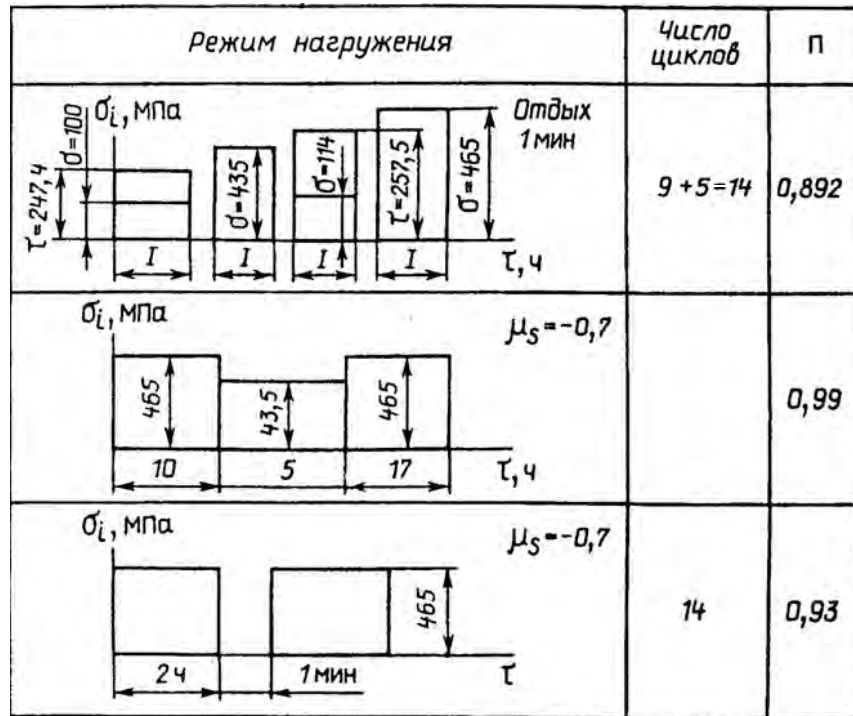


Рис. 4. Режимы нагружения и расчетные значения меры повреждений Π (материал ЭП-182) для случая сложного напряженного состояния

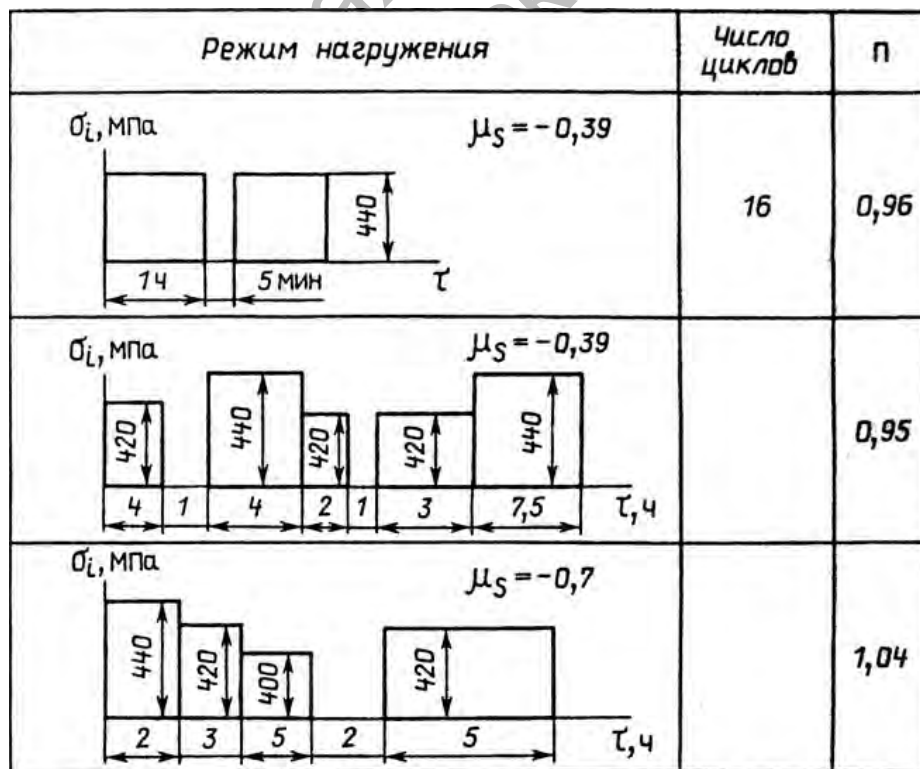


Рис. 5. Режимы нагружения и расчетные значения меры повреждений Π (материал ЭИ-765) для случая сложного напряженного состояния

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов, П. А. Длительное разрушение жаропрочных сталей при нестационарном нагружении / П. А. Павлов, Н. Н. Курилович // Проблемы прочности. – 1982. – № 2. – С. 44–47.

2. Павлов, П. А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность / П. А. Павлов. – Л. : Машиностроение, 1988. – 252 с.

3. Курилович, Н. Н. Описание ползучести жаропрочных сталей в условиях циклического режима нагружения / Н. Н. Курилович, Л. И. Огородов // Машиностроение. – 1988. – № 1. – С. 23–26.

4. Курилович, Н. Н. Деформирование материалов в условиях циклической ползучести / Н. Н. Курилович, Л. И. Огородов // Весці НАН Беларусі. – 1987. – № 4. – С. 19–21.

5. Подбедря, Е. Е. Основы математической теории термовязкоупругости / Е. Е. Подбедря. – М. : Наука, 1970. – 280 с.

6. Писаренко, Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. – Киев : Наукова Думка, 1976. – 415 с.

Могилевский государственный университет продовольствия
Вологодский государственный технический университет
Материал поступил 22.06.2008

N. N. Kurilovich, L. F. Kotyagov, L. I. Ogorodov
Evaluation of damage accumulation in steels
under alternating loading

Rate equations for damage level evaluation at repeated and complex loadings while linear and combined stress are given in the article. To construct these equations real and functional parameters are determined on the base of simple experiments. The parameters possess a better flexibility at damage level determination. The equations are in good agreement with experiments that have been carried out in conditions of combined and stress state and complex load.