

УДК 621.539.376

**А. В. Желдубовский, А. Т. Сердитов, Ю. В. Ключников,
Г. С. Моисеенко, Б. С. Романов**

СПОСОБ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАТЕРИАЛА ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ СТАТИСТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Введение

Определение деформационных и прочностных характеристик материалов при постоянной нагрузке и температуре в течение длительного времени является одним из классических методов оценки их жаропрочных свойств. Разрушение материала в этих условиях не протекает спонтанно, а является следствием реализации различных процессов, существенно ухудшающих его исходную структуру. В совокупности они приводят к визуально наблюдаемым процессам зарождения и роста пор и микротрещин, вследствие чего происходит разрушение поверхности материала и снижение его плотности. Интегральной оценкой изменений, являющихся результатом этих процессов, служит величина накопленной поврежденности ω .

Отсутствие однозначного определения параметра поврежденности обуславливает развитие экспериментальных методов оценки этой величины, основанных на регистрации изменений физико-механических характеристик материала, наиболее чувствительных к тому виду нагружения, ко-

торый эти повреждения вызывает. В качестве характеристик, изменение которых идентифицируется как накопление повреждений при ползучести, используются практически все металлографические (плотность дислокаций, поры, трещины) и некоторые физические (рассеянная энергия, электросопротивление, плотность, акустическая эмиссия) характеристики материала, отражающие протекание в нем процессов деформирования.

Детальный анализ известных методов оценки поврежденности при ползучести представлен в работах [1] – [3].

Следствием развития и количественного роста дефектов в структуре материала в условиях длительного температурно-силового воздействия является снижение несущей способности, проявляющееся в уменьшении воспринимающей нагрузку эффективной площади поперечного сечения. Согласно [4] – [5], параметр поврежденности в этом случае задается соотношением:

$$\omega = \frac{\Delta F}{F_0} = 1 - \frac{F(t)}{F_0}, \quad (1)$$

где F_0 , $F(t)$ – начальное и текущее значения площади поперечного сечения, воспринимающего нагрузку; ΔF – приращение площади.

В связи с этим меняется и уровень действующего напряжения, которое с использованием (1) записывают в виде

$$\sigma_{эф} = \frac{P}{F(t)} = \frac{\sigma_0}{1 - \omega}, \quad (2)$$

где σ_0 , $\sigma_{эф}$ – начальное и эффективное значения напряжений.

Концепция эффективного напряжения явилась наиболее логичной и плодотворной в решении проблемы идентификации параметра поврежденности, о чем свидетельствует тот факт, что на основе этого подхода разработаны методы оценки параметра поврежденности ω , доведенные до практической реализации с построением эволюционных кривых поврежденности реальных материалов [1], [2]. Косвенным подтверждением этому является, в частности, и то, что структура соотношения (1) для задания параметра поврежденности используется в большинстве известных методов идентификации ω и символу F придается физический смысл характеристик материала от плотности дислокаций [6] до модуля упругости [2].

Постановка задачи

Разработки экспериментальных методов определения ресурса материала изделия, работающего под нагрузкой, в рамках анализируемого подхода является малоперспективной в силу её неоправданно высокой трудоемкости. Обусловлено это, с одной стороны, отсутствием критериев раз-

рушения в существующих методах оценки поврежденности, а с другой – в весьма ограниченной применимости стандартного условия разрушения $\omega=1$ к соотношениям (1) и (2), на которых большинство из этих методов построены.

Расчетно-экспериментальная методика оценки остаточного ресурса материала

В настоящей работе рассматривается расчетно-экспериментальная методика оценки остаточного ресурса материала, работающего в условиях ползучести, основанная на оценке текущих значений накопленной поврежденности в процессе ползучести материала в течение начального промежутка времени, произвольно меньшего долговечности при заданном уровне напряжений. Определение уровня накопленной поврежденности в материале осуществляется по замеру упругой компоненты деформации при разгрузке образца в процессе ползучести, как это описано в [7]. С тем отличием, что идентификация параметра поврежденности осуществляется не в рамках концепции эффективного модуля упругости, как это реализовано в [7], а используется представление о поврежденности как о части удельной работы деформации. При этом в качестве критерия разрушения предлагается удельная работа деформации, реализуемая при напряжении, равном пределу прочности, т.е. принимается гипотеза о том, что напряжение разрушения при длительном нагружении не превышает предела прочности S_u , выраженного в истинных напряжениях.

$$S_u = \frac{\sigma_B}{1 \cdot \psi}, \quad (3)$$

где σ_B – предел прочности в номинальных напряжениях;

ψ – относительное сужение поперечного сечения.

Таким образом, поврежденность материала при длительном нагружении, в момент времени $t=t_i$, определяется из соотношения:

$$\omega_i = \frac{a_i}{a_R}, \quad (4)$$

где a_i , a_R – текущее, соответствующее напряжению S_i , и полное, соответствующее S_u , значения удельной работы деформации, оцениваемые по диаграмме деформирования в координатах «истинное напряжение S -истинная деформация e », рис. 1 (a_i -заштрихованная область).

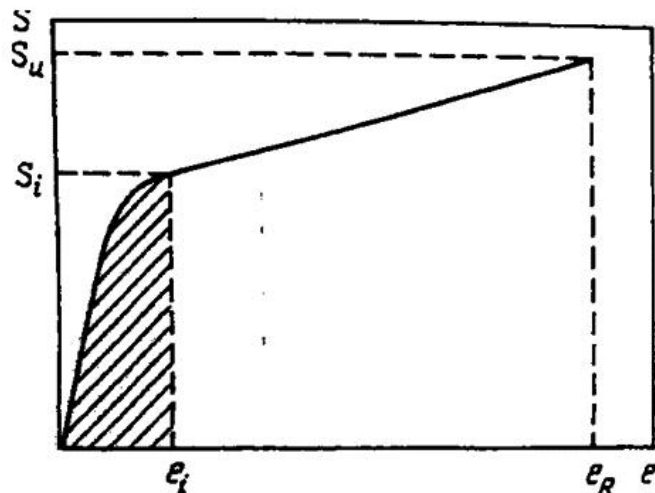


Рис. 1. Схема определения текущих значений поврежденности при ползучести

Текущее значение удельной работы деформации a_i определяется в процессе длительного нагружения по величине упругой компоненты деформации ε^e , измеряемой в момент разгрузки как разность между полной деформацией в нагруженном состоянии ε^Σ и деформацией ползучести ε^c

$$\varepsilon^e = \varepsilon^\Sigma - \varepsilon^c \Rightarrow e^e = \ln(1 + \varepsilon^e), \quad (5)$$

Определив действующее напряжение как

$$S_i = Ee^e, \quad (6)$$

где E – модуль упругости, по диаграмме S - e находим соответствующую ему деформацию e_i и значения удельной работы деформации a_i , a_R из соотношений [8]

$$a_i = \int_0^{e_i} f(e)de \Rightarrow a_R = \int_0^{e_R} f(e)de, \quad (7)$$

где $f(e)$ – функция, описывающая диаграмму деформирования (в работе использовалось соотношение Ромберга-Освуда: $S = ke^{\frac{1}{m}}$);

e_R – истинная деформация, соответствующая пределу прочности S_u ;
 k и m – материальные константы.

Для решения задачи установления остаточного ресурса необходимо определение трех текущих значений накопленной поврежденности $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ по вышеприведенной процедуре с соблюдением условия равенства промежутков времени между замерами $t_1 = t_2 = t_3 = t$. Полученные значения ω_i и t подставляются в систему уравнений

$$[K(\frac{t}{t_R} + \omega_i - 1)]^2 + [K(\omega_i - \frac{t}{t_R}) + b_\sigma]^2 = R_\sigma^2, \quad (8)$$

где $i=1, 2, 3$; $K = \sqrt{2}/2$; b_σ , R_σ – коэффициенты.

Соотношение (8) представляет собой аппроксимацию кинетической кривой поврежденности дугой окружности в координатах $\omega + t/t_R$ (рис. 2), которые в результате преобразования (перенос и поворот) принимают значения

$$x' = k(t/t_R + \omega_i - 1); \quad y' = k(\omega - t/t_R). \quad (9)$$

Выбор аппроксимирующей кривой в виде дуги окружности, в отличие от других известных вариантов аппроксимаций, например [9], обусловлен не столько простотой последующих математических преобразований или использования известных аналогий в представлении кинетических кривых ω именно дугой окружности [1], [10], [11], сколько возможностью придать коэффициентам b и R в соотношении (8) физический смысл величин, зависящих от уровня действующих напряжений. После замены переменной $1/t_R = Z$ и ряда преобразований система уравнений (8) аналитически приводится к нелинейному уравнению вида:

$$\alpha Z^3 + \beta Z^2 + \gamma Z + \delta = 0, \quad (10)$$

где $\alpha = -2t^3$; $\beta = -t^2(5\omega_1 - 8\omega_2 + 3\omega_3)$;

$\gamma = t(\omega_1^2 - 2\omega_2^2 + \omega_3^2 - 2\omega_1 + 4\omega_2 - 2\omega_3)$;

$\delta = \omega_1^2(\omega_3 - \omega_2) + \omega_2^2(\omega_1 - \omega_3) - \omega_3^2(\omega_1 - \omega_2)$.

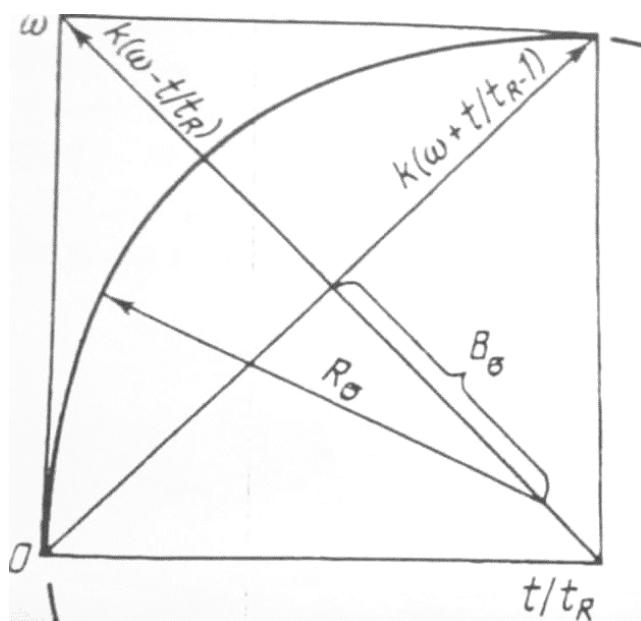


Рис. 2. Схема аппроксимации кинетической кривой поврежденности

Определение времени разрушения образца

Уравнение (10) решается методом Кордано и с учетом замены $Z=1/t_R$ определяется время до разрушения t_R . Для построения кинетической кривой поврежденности из (8) определяются коэффициенты b_σ , R_σ . Апробация метода осуществлялась при испытаниях на ползучесть образцов сплава ХН55МВЦ при температуре $\theta=650^\circ\text{C}$. Исследования проводились на установке МИР-СТВ [12] с размещением образца в вакуумной камере и обеспечением возможности визуального контроля его поверхности. На контролируемую поверхность образца предварительно, например, с помощью микротвердомера ПМТ-3 наносится делительная сетка, поперечные линии которой служат резервными точками при измерении деформаций. После нагрева образца до температуры испытания по продольным линиям разметки осуществляется измерение исходной длины участков поверхности, которые предполагается контролировать в процессе испытания. Необходимые три значения компоненты упругой деформации через установленные промежутки времени получают путем измерения выбранных участков поверхности образца в нагруженном состоянии и после разгрузки. Использование делительной сетки с размером ячейки $(1 \times 1) 10^{-3}$ м и высокотемпературного металлографического микроскопа МВТ-71 с окуляр-микрометром позволяет измерять деформацию с точностью $\pm 7,5 \cdot 10^{-7}$ м. Кривая кратковременного деформирования строилась по результатам испытаний образцов сплава при $\theta=650^\circ\text{C}$ на разрывной машине РН-30 «Shimadzu». На рис. 3 и в табл. 1 приведены результаты испытаний двух партий образцов сплава при напряжениях 200 и 250 МПа.

Таблица 1.

Результаты испытаний образцов

№	$\sigma, \text{МПа}$	$t, \text{час}$	ω_1	ω_2	ω_3	$t_{R, \text{час}}^{\text{расч}}$	$t_{R, \text{час}}^{\text{эксп}}$	$\Delta, \%$
1	250	5	0,100	0,330	0,658	45,0	58,3	22,8
2	200	20	0,154	0,202	0,328	188,7	227,0	16,7

Расчет долговечности осуществлялся по трем значениям ω_i . Замеры упругой компоненты деформации проводились на протяжении всего периода испытаний до разрушения для сравнения полученных данных с расчетной, кинетической кривой (рис. 3).

Из приведенных сопоставлений можно сделать вывод об удовлетворительном согласовании расчетных и экспериментальных данных.

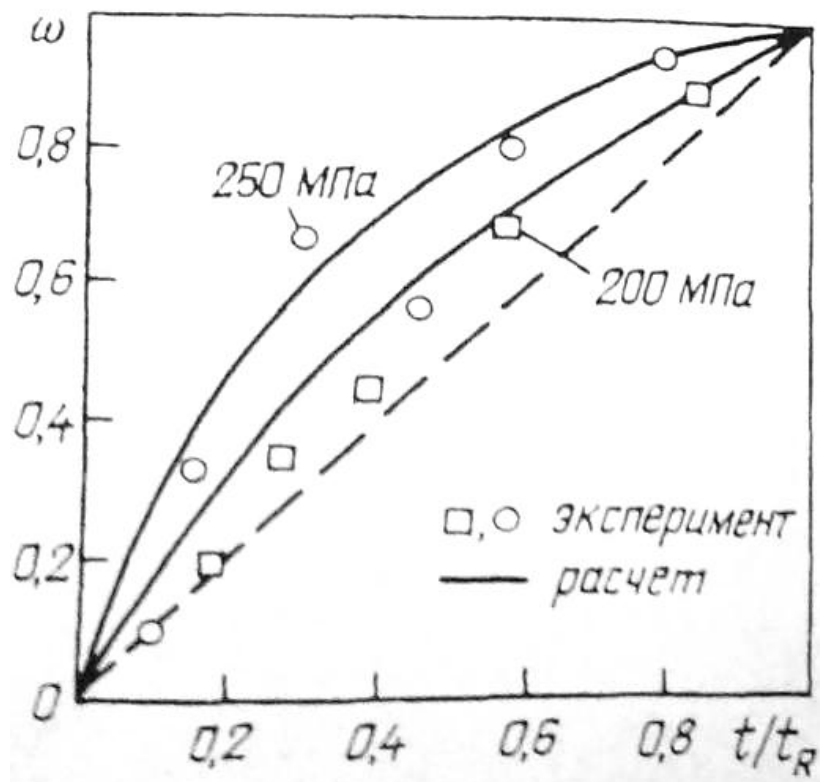


Рис. 3. Кинетические кривые поврежденности образцов сплава ХН55МВЦ при температуре $\theta=650^{\circ}\text{C}$

Очевидно также, что приведенные результаты демонстрируют существенно нелинейный характер накопления повреждений в материале при ползучести с проявлением обоих нелинейных эффектов, формулируемых нелинейной механикой поврежденности [1], [13]. Наблюдается нелинейный характер зависимости накопленной поврежденности от времени, а также расслоение кинетических кривых ω в зависимости от уровня действующих напряжений.

Выводы

В заключение следует отметить, что предлагаемая методика разработана применительно к образцам, т.е. лабораторному циклу исследований и имеет ограничения в связи с необходимостью использования вакуума и соответствующего оптического увеличения. Применительно к промышленным методам экспресс-диагностики, первое успешно компенсируется напылением неокисляющихся тест-площадок с необходимой разметкой, по аналогии с привариваемыми на трубопроводах образцами-свидетелями [14]. Второе, при современном уровне развития волоконной и стробоскопической оптики, не накладывает ограничений на возможности визуального контроля поверхности большинства конструктивных элементов, работающих в условиях высокотемпературного длительного нагружения независимо от температурно-силовых режимов нагружения.

Список использованной литературы

1. *Голуб В. П.* Высокотемпературное разрушение материалов при циклическом нагружении / В. П. Голуб, А. Д. Погребняк Киев: Наук, думка, 1994.-228 с.
2. *Chaboche J. L.* Continuous damage mechanics-a tool to describe phenomena before crack initiation // Nuclear Engineering and Design.-1991-64-P. 233-247.
3. *Lemaitre J.* Coupled elasto-plasticity and damage constitutive equations // Computer Methods in Appl. Mech. and Eng.-1985-N 51.-P. 31-49.
4. *Работнов Ю. Н.* Ползучесть элементов конструкций / Ю. Н. Работнов М.: Наука, 1966-752 с.
5. *Качанов Л. М.* Основы механики разрушения / Л. М. Качанов М.: Наука, 1974.-312 с.
6. *Dyson V.F.* Damage Equations for physically-based creep life // V. F. Dyson, F. A. Leckie Adv. Fract. Res.: 7th Int. Conf. Fracture.-Houston, Tex., 1989-P. 2169-2175.
7. *Голуб В. П., Желдубовский А. В., Романов А. В.* Способ определения поврежденности материала при ползучести / А.с. СССР № 1679257 // Бюллетень изобретений.-1991.-№ 35-157 с.
8. *Фридман Я. Б.* Механические свойства металлов. В 2-х ч.-М.: Машиностроение, 1974.-Ч. I: Деформация и разрушение.-472 с.
9. *Fonseka G. U., Krajcinovic D.* The continuum damages theory of brittle materials. Part 2: Uniaxial and plan response models // ASME J. of Appl. Mech.-1981.-48, N4.-P. 816-824.
10. *Leckie F. A.* Constitutive equations for creep rupture // F. A. Leckie, D. R. Hayhurst Acta Met.-1977-N25-P. 1059-1070.
11. *Kujawski D., Ellyin F.* On the concept of cumulative fatigue damage // Int. J. of Fract.-1988-37, N 2.-P. 263-278.
12. *Желдубовский А. В.* Установка для исследования микротвердости жаропрочных материалов в процессе высокотемпературного многоциклового нагружения // Пробл. прочности.-1981-№ 9-С. 111-114.
13. *Голуб В. П.* Нелинейная механика континуальной поврежденности и её приложение к задачам ползучести и усталости // Прикл. механика.-2000.-36.-№3.-С. 32-67.
14. *Каминский А. А., Бастуй В. Н.* Методы определения напряженно-деформированного состояния и трещиностойкости газо- и нефтепроводов // Прикл. механика.-1997.-33 № 7.-С. 3-30.