

УДК 539.376

© 2005 г. А.М. ЛОКОЩЕНКО

НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

Предложен метод измерения поврежденности структуры металлов, накапливающейся в процессе высокотемпературной ползучести при одноосном растяжении. Этот метод основан на одновременном измерении продольных деформаций и величин электрического сопротивления образцов и сопоставлении этих экспериментальных данных. В отличие от других методов, он позволяет проводить измерение поврежденности в процессе испытания на ползучесть, без разгрузки и охлаждения образцов. В результате обработки приведенных опытных данных с помощью предложенного метода получены экспериментальные зависимости накопленной поврежденности материала от времени. Анализ этих зависимостей позволяет сделать вывод, что поврежденность материала при разрушении образцов является монотонно убывающей функцией от напряжения. Такой же результат получен при измерении поврежденности металла с помощью металлографического метода. Приведена интерпретация полученного результата. С помощью модифицированного подхода Броберга проведено математическое моделирование экспериментальных данных, получено соответствие между экспериментальными и теоретическими зависимостями деформации ползучести и поврежденности от времени.

1. Введение. При оценке прочности конструкций, работающих в условиях высоких температур, один из основных вопросов – определение времени разрушения этих конструкций. При исследовании ползучести металлов вплоть до разрушения с помощью феноменологического подхода обычно выделяются два основных механизма разрушения: вязкий и хрупкий. Вязкое разрушение наступает в результате процесса ползучести, характеризующегося большими сдвиговыми деформациями, хрупкое разрушение связано с возникновением микропор и микротрещин и их постепенным слиянием. В качестве параметра, характеризующего степень нарушения структуры металлов при ползучести, рассматривается поврежденность ω . В данной статье основное внимание уделяется методу определения поврежденности металла при ползучести, вычисляемой по данным измерения электрического сопротивления образцов. С помощью кинетической теории ползучести проведено математическое моделирование полученных экспериментальных результатов.

2. Поврежденность материала и известные методы ее измерения. Л.М. Качанов [1] и Ю.Н. Работнов [2] – первые ученые, которые ввели в теоретическое рассмотрение новый параметр: зависящий от времени t структурный параметр $\omega(t)$, характеризующий степень поврежденности материала, накапливающейся в процессе ползучести. Ю.Н. Работнов впервые использовал этот параметр для аналитического описания разупрочняющейся стадии процесса ползучести, завершающейся разрушением. В качестве начала отсчета времени t ($t = 0$) как обычно принимается момент приложения внешней нагрузки. Согласно [1, 2], в начале процесса ползучести принимается условие $\omega(0) = 0$, разрушению образца при $t = t^*$ соответствует значение $\omega^* = \omega(t^*) = 1$. В [3] Ю.Н. Работнов предложил использовать для описания ползучести и длительной проч-

ности конструкционных металлов механическое уравнение состояния, в которое входят не один, а несколько структурных параметров, а также систему кинетических уравнений для их определения. Впоследствии этот метод позволил описать многие особенности процесса ползучести. Различные варианты определяющих соотношений теории ползучести со структурными параметрами предложены в работах многих отечественных и зарубежных ученых.

В большинстве теоретических исследований введение параметра поврежденности ω имеет чисто феноменологический характер, при этом связь параметра ω с фактическим изменением структуры материала не рассматривается. Однако наряду с ними известны экспериментальные работы, в которых параметр поврежденности связывается с реальным нарушением структуры материала, исследование структуры обычно проводится металлографическими или физическими методами.

Большинство исследователей объясняет протекание процесса ползучести накоплением пор и образованием микротрещин (см. [4, 5] и др.). В результате объединения мелких разобленных трещин возникает разрушающая магистральная трещина. Поврежденность материала можно оценить как долю суммарного объема пор и трещин в единице объема. Согласно принципу Кавальери, доля объема, занятого порами, равна доле их площади на шлифе. В [6] показано, что поврежденность, определенная указанным способом, практически такая же, как и поврежденность, определенная с помощью измерения плотности.

В [7] за меру поврежденности ω принимается длина трещины, а за время разрушения t^* – время образования трещины длиной в одно зерно. В [8] в качестве ω рассматривается размер одиночной поры, а в качестве t^* – время достижения этим размером критической величины. В [9] за меру поврежденности ω принимается отношение радиуса поры к половине расстояния между порами, за t^* – время, при котором происходит слияние пор ($\omega^* = 1$). В [10] при анализе структуры используются два параметра: плотность пор и их средний объем. В [11] поврежденность материала измеряется на основе микрошлифов с помощью использования прозрачной эталонной квадратной сетки; при этом рассматривается отношение количества узлов, попадающих в область пор и микротрещин, к общему количеству узлов в сетке. В [12] под ω понимается отношение суммарной длины поперечных границ между зернами, занятых порами и микротрещинами, к общей длине всех поперечных межзеренных границ. В некоторых статьях ([13, 14] и другие) в качестве структурного параметра фигурирует плотность дислокаций.

В ряде работ описано уменьшение плотности металлов в процессе испытаний на ползучесть ([15–19] и др.), оно вызывается локальными разрушениями вследствие концентрации напряжений у включений и вблизи стыка трех зерен. Измерение плотности производится известными методами с помощью точного (до 10^{-5} Н) взвешивания на воздухе и в жидкости. Кинетическое уравнение для определения разрыхления выводится из условия сохранения массы [19]. Авторы [20] считают, что разрушение материала наступает при накоплении критического количества микроповреждений, которое они определяют по данным измерения плотности и микротвердости. В [21] приведен подробный обзор литературных данных по исследованию зависимости относительного изменения плотности от деформации, напряжения, температуры и времени.

3. Метод измерения поврежденности металлов в процессе испытания на ползучесть. Все рассмотренные выше способы введения параметра поврежденности не позволяют проводить его измерение во время испытаний на ползучесть. Для определения величины ω в произвольный момент времени t указанными методами необходимо прекратить испытание, а при использовании методов металлографии, кроме этого, и разрезать образец.

В данной работе рассматривается метод измерения структурных изменений в металле непосредственно в ходе высокотемпературной ползучести, без охлаждения и разгрузки образцов. Для достижения этой цели предлагается проводить измерение электрического сопротивления $R(t)$ цилиндрических образцов при чистом растяжении и сопоставлять эти данные с результатами измерения длины $l(t)$ испытываемых образцов при тех же значениях времени t .

В процессе испытания цилиндрических образцов на растяжение их электросопротивление увеличивается по двум причинам. Первая причина заключается в увеличении длины и соответствующем уменьшении поперечных размеров образца. Вторая причина увеличения R объясняется изменением структуры материала, характеризующим образованием пор и микротрещин, их накоплением и слиянием, вплоть до образования магистральных трещин. Здесь предполагается, что эти два фактора действуют независимо друг от друга. Электросопротивление $R(t)$ нагруженного образца, находящегося в условиях ползучести, можно представить в виде суммы пяти слагаемых:

$$R(t) = R_0 + \Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3(t) + \Delta R_4(t) \quad (3.1)$$

где R_0 – электросопротивление ненагруженного образца при температуре T ; ΔR_1 и ΔR_2 – приращения R при мгновенном нагружении, вызванные соответственно удлинением сплошного образца и возникновением дефектов в его структуре; $\Delta R_3(t)$ и $\Delta R_4(t)$ – приращения R при ползучести, также вызываемые этими факторами.

Сначала рассмотрим случай отсутствия микроповреждений в образце. При этом необходимо учесть следующие условия: постоянство объема образца при однородном деформировании (до образования шейки), неизменность его удельного сопротивления γ в процессе испытания, а также прямую пропорциональность электросопротивления R образца его длине и обратную пропорциональность площади его поперечного сечения. В этом случае из (3.1) получаем

$$R(t) = R_0 + \Delta R_1 + \Delta R_3(t) = \frac{\gamma l(t)}{F(t)} = \frac{\gamma l_0 \left(\frac{l}{l_0}\right)^2}{F_0 \left(\frac{l}{l_0}\right)^2} = R_0 \left(1 + \frac{\Delta l_0}{l_0} + \frac{\Delta l_t}{l_0}\right)^2 \quad (3.2)$$

$$l_0 = l_{00}(1 + \alpha T)$$

где F_0 и $F(t)$ – площади поперечного сечения стержня при температуре T перед нагружением ($t = -0$) и при произвольном значении $t > 0$ соответственно; l_{00} и l_0 – длины ненагруженного образца соответственно при комнатной температуре и заданной температуре T ; α – коэффициент линейного температурного расширения; Δl_0 – удлинение образца, появившееся при нагружении; Δl_t – удлинение, накопленное в процессе ползучести. Из (3.2) следует

$$\Delta R_1 = \frac{2R_0 \Delta l_0}{l_0} \left(1 + \frac{\Delta l_0}{2l_0}\right), \quad \Delta R_3(t) = \frac{2R_0}{l_0} \Delta l_t \left(1 + \frac{\Delta l_0}{l_0} + \frac{\Delta l_t}{2l_0}\right) \quad (3.3)$$

При мгновенном нагружении с учетом поврежденности, полагая в (3.1) значение $t = +0$, получаем

$$R_0 + \Delta R_1 + \Delta R_2 = \bar{R}_0 \quad (3.4)$$

где \bar{R}_0 – определяемое опытным путем значение электросопротивления образца сразу после его нагружения.

В общем случае рассматривается последовательность процессов кратковременного нагружения и последующей ползучести образцов. Экспериментальные данные

свидетельствуют о том, что поврежденность структуры материала, появившаяся вследствие мгновенного нагружения, мала по сравнению с уровнем поврежденности, накапливаемой в процессе ползучести. Поэтому здесь рассматривается только поврежденность $\omega(t)$, приобретаемая материалом при ползучести.

Подставляя (3.4) в (3.1), получаем выражение для $\Delta R_4(t)$:

$$\Delta R_4(t) = R(t) - \tilde{R}_0 - \Delta R_3(t) \quad (3.5)$$

Величина $\Delta R_4(t)$ определяет приращение электросопротивления образца, вызываемое изменением его структуры в процессе ползучести. В качестве меры поврежденности материала примем отношение

$$\omega(t) = \Delta R_4(t)/R_0 \quad (\omega(0) = 0) \quad (3.6)$$

Представляет интерес оценить соотношение приращений электросопротивления $\Delta R_3(t)$ и $\Delta R_4(t)$ при ползучести, вызываемых разными причинами. В качестве количественной характеристики роли накопления поврежденности материала в увеличении электросопротивления образца в процессе ползучести естественно ввести величину

$$\chi(t) = \Delta R_4(t)/(\Delta R_3(t) + \Delta R_4(t)) \quad (3.7)$$

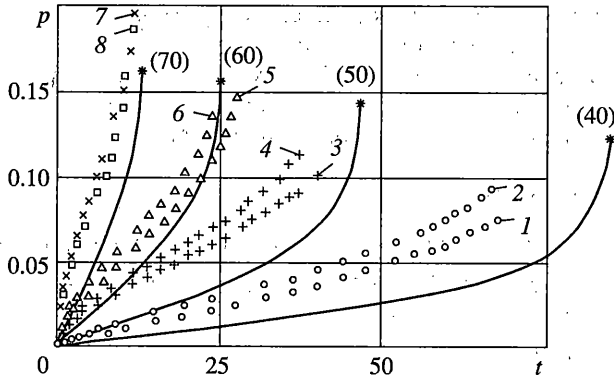
4. Экспериментальное исследование ползучести и длительной прочности цилиндрических медных образцов при растяжении. В данном пункте приведены результаты детального анализа экспериментальных данных, частично описанных ранее [22]. Все использованные в испытаниях образцы были изготовлены из одного медного стержня. Ниже приводится анализ опытных данных, полученных на 8 образцах I серии (с постоянным поперечным сечением) и на 6 образцах II серии (с кусочно-постоянным сечением) при постоянной растягивающей силе.

Образцы I серии имели рабочую длину $l_{00} = 50$ мм, их номера от № 1 до № 8. Во всех этих образцах растягивающие напряжения σ_0 в начальный момент времени равны 40, 50, 60 или 70 МПа (под σ_0 здесь и всюду ниже понимается условное напряжение, равное отношению растягивающей силы к площади недеформированного сечения). Образцы II серии имеют две (№№ 9–11) или три (№№ 12–14) ступени вдоль продольной оси. Рабочая длина всех образцов II серии составляла $l_{00} = 80$ мм. Величины диаметров различных ступеней этих образцов подобраны таким образом, чтобы при растяжении напряжение на каждой ступени равнялось одному из характерных значений σ_0 (40, 50 или 60 МПа).

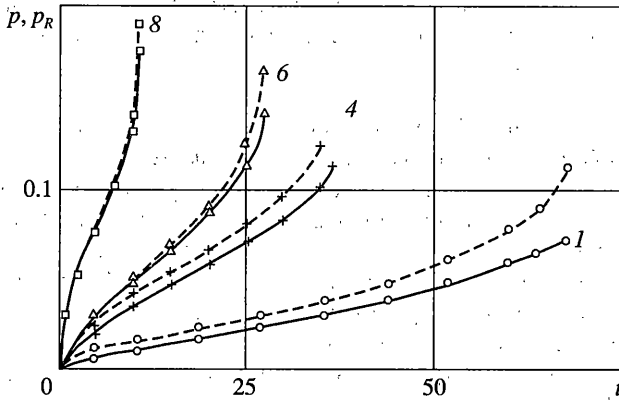
После изготовления все образцы обеих серий были подвергнуты одновременному отжигу в вакууме $1.3 \cdot 10^{-8}$ атм в течение двух часов при температуре 800°C и последующему охлаждению с печью. Исследование ползучести и длительной прочности всех образцов проводилось при температуре $T = 400^\circ\text{C}$.

Предварительные испытания образцов I серии показали, что условный предел текучести исследуемого материала при $T = 400^\circ\text{C}$ составляет $\sigma_{0s} = 30$ МПа, а условный предел прочности $\sigma_{0b} = 118$ МПа. Используемый материал при 400°C обладает существенной нелинейностью мгновенных свойств, исследуемый диапазон напряжений ($\sigma_0 = 40\text{--}70$ МПа) находится выше предела текучести. Коэффициент α линейного температурного расширения меди при температуре $T = 0\text{--}400^\circ\text{C}$ равен $\alpha = 18 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$, так что длина l_0 ненагруженного стержня при $T = 400^\circ\text{C}$ в соответствии с (3.2) равна 50.35 мм. При обработке результатов испытаний I серии образцов рассматривались две меры деформации: обычная логарифмическая мера деформации

$$\varepsilon(t) = \ln(l(t)/l_0) \quad (4.1)$$



Фиг. 1



Фиг. 2

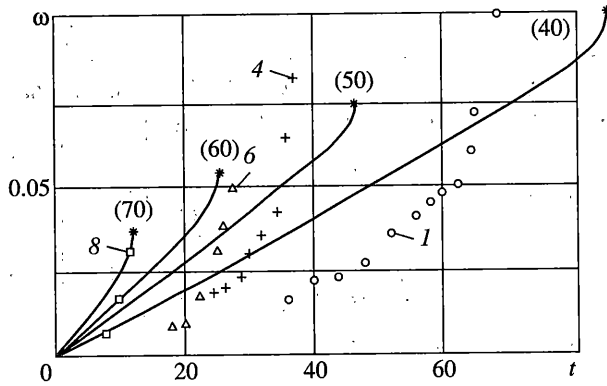
использующая данные автоматической записи удлинения образца в процессе ползучести, и мера

$$\epsilon_R(t) = 0.5 \ln(R(t)/R_0) \quad (4.2)$$

использующая результаты измерения электрического сопротивления образцов. При выводе (4.2) предполагалось отсутствие микровреждений в образцах. В соотношениях (4.1), (4.2) под l_0 и R_0 , как и выше, понимаются длина и электросопротивление образца при заданной температуре ($T = 400^\circ\text{C}$) перед нагружением. Мгновенные деформации $\epsilon_0 = \epsilon(t = +0)$ при $T = 400^\circ\text{C}$ при $\sigma_0 = 40, 50, 60, 70$ МПа соответственно равны 0.012, 0.018, 0.029 и 0.046. Деформации ползучести $p(t)$ и $p_R(t)$, определяемые различными способами, вычисляются с помощью следующих соотношений:

$$p(t) = \ln\left(1 + \frac{\Delta l_t}{l_0 + \Delta l_0}\right), \quad p_R(t) = \frac{1}{2} \ln \frac{R(t)}{R_0} - \frac{1}{2} \ln \frac{\bar{R}_0}{R_0} = \frac{1}{2} \ln \frac{R(t)}{\bar{R}_0} \quad (4.3)$$

Результаты испытаний образцов I серии приведены на фиг. 1–3 (t [час]) и в табл. 1. На фиг. 1 показаны кривые ползучести $p(t)$ для всех 8 образцов. На фиг. 2 для некоторых образцов приведены кривые ползучести $p(t)$ и $p_R(t)$ (сплошные и штриховые линии соответственно) при различных значениях σ_0 [МПа] (значения σ_0 на фиг. 1 и



Фиг. 3

других фигурах обозначены в скобках). Полученные в испытаниях экспериментальные кривые $l(t)$ и $R(t)$ для каждого образца позволили вычислить зависимости параметра поврежденности $\omega(t)$ от времени при различных напряжениях (см. фиг. 3). В табл. 1 приведены номера испытанных образцов, величины начального напряжения σ_0 , значения скорости установившейся ползучести \dot{p}_0 , продольной деформации перед разрушением p^* , времени разрушения t^* и других характерных параметров испытаний для всех 8 образцов. Значения всех параметров, соответствующих времени разрушения образцов, отмечены в табл. 1 звездочкой. Приводимые в табл. 1 значения ΔR_3^* , \bar{R}_0 , ΔR_4^* , ω^* , χ^* получены с помощью соответственно (3.3)–(3–7). Значения χ^* (0.05–0.38) показывают, что приращение электросопротивления ΔR_4 , вызываемое накоплением дефектов структуры в процессе ползучести, мало по сравнению с приращением ΔR_3 , вызываемым удлинением образца без повреждений. Табл. 1 показывает, что наблюдается явная монотонно убывающая зависимость значений χ^* от напряжения σ_0 .

В табл. 2 для каждой i -й ступени ($i = 1, 2, 3$) образцов II серии приведены значение начального напряжения σ_{0i} , исходная рабочая длина l_{00i} и удлинение Δl_i^{**} каждой ступени (измеренное после разрушения образца, его остывания и извлечения из пе-

Таблица 1

№	σ_0 , МПа	\dot{p}_0 , час ⁻¹	p^*	t^* , час	R_0 , мкОм	\bar{R}_0 , мкОм	R^* , мкОм	ΔR_3^* , мкОм	ΔR_4^* , мкОм	p_R^*	ω^*	χ^*	Ω^*
1.	40	0.0010	0.075	68.0	96.8	101.0	127.0	15.8	10.2	0.115	0.101	0.38	0.44
2.			0.093	66.5	99.4	102.5	131.2	20.6	8.1	0.123	0.077	0.27	
3.	50	0.0021	0.100	40.0	123.4	126.5	162.6	27.9	8.2	0.126	0.059	0.20	0.36
4.			0.113	37.0	121.9	125.0	167.7	31.5	11.2	0.147	0.083	0.24	
5.	60	0.0036	0.132	24.0	148.5	154.5	209.5	46.2	8.8	0.152	0.046	0.12	0.26
6.			0.142	27.8	148.5	158.4	220.5	50.3	11.3	0.164	0.062	0.15	
7.	70	0.0108	0.187	11.8	170.0	182.4	272.4	80.4	9.3	0.201	0.027	0.05	0.11
8.			0.179	11.5	171.5	187.6	275.0	77.3	10.1	0.191	0.032	0.06	

Таблица 2

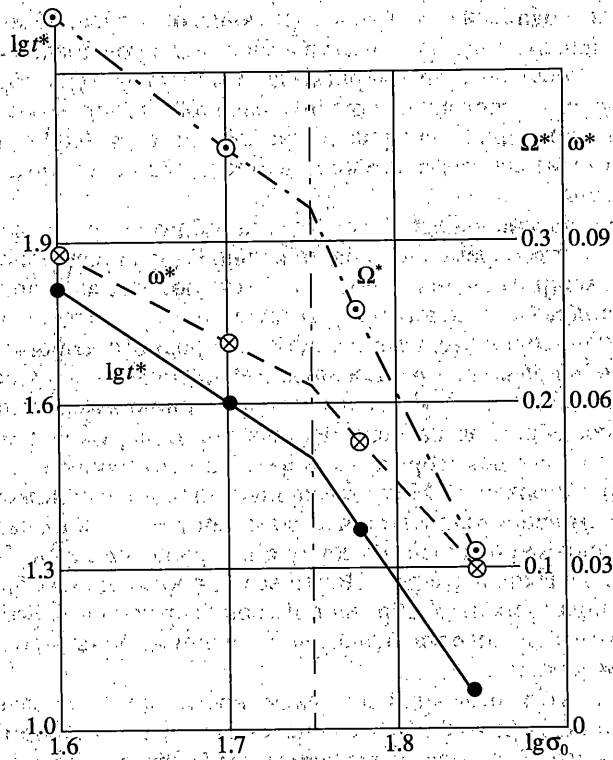
№	σ_{01} , МПа	σ_{02} , МПа	σ_{03} , МПа	l_{001} , мм	l_{002} , мм	l_{003} , мм	Δl_1^{**} , мм	Δl_2^{**} , мм	Δl_3^{**} , мм	max σ_0 , МПа	t^* , час
9	50	40	—	40	40	—	6.3	1.5	—	50	42
10	50	40	—	40	40	—	6.1	2.2	—	50	40
11	50	40	—	40	40	—	6.8	1.6	—	50	43
12	60	50	40	25	25	30	6.7	2.2	0.8	60	20
13	60	50	40	25	25	30	6.3	2.0	1.0	60	25
14	60	50	40	25	25	30	7.0	2.2	1.0	60	21

чи), а также для каждого образца максимальное значение σ_0 и время разрушения t^* . Каждый из идентичных образцов №№ 9–11 представлял собой два последовательных соосных цилиндра с различными диаметрами, растягиваемые напряжениями 40 и 50 МПа. Время разрушения такого образца ступенчатого сечения определяется, естественно, значением максимального напряжения в сечении, т.е. $\sigma_0 = 50$ МПа. Образцы №№ 12–14 состоят из трех последовательных участков различного диаметра с напряжениями $\sigma_0 = 40, 50$ и 60 МПа, время их разрушения определяется значением напряжения $\sigma_0 = 60$ МПа.

Вычислим среднее значение времени разрушения t^* , соответствующее каждому из рассматриваемых величины σ_0 . Результаты испытаний образцов I и II серий показывают, что средние величины t^* при значениях $\sigma_0 = 40, 50, 60$ и 70 МПа составляют соответственно 67.2, 40.4, 23.6 и 11.6 час.

На фиг. 4 представлены зависимости среднего времени разрушения t^* [час] и предельной средней поврежденности ω^* от номинального напряжения σ_0 [МПа]. Из фиг. 4 (также, как и из табл. 1) следует монотонно убывающий характер $\omega^*(\sigma_0)$. Кривая длительной прочности в логарифмических координатах $\lg \sigma_0 - \lg t^*$ и зависимость предельной поврежденности ω^* от номинального напряжения σ_0 в полулогарифмических координатах $\omega^* - \lg \sigma_0$ обнаруживают характерный для ряда металлов излом внутри рассматриваемого диапазона изменения напряжения σ_0 (при $\sigma_0 = 56$ МПа). Этот излом разделяет области изменения напряжений с различными видами разрушения.

Опыты показывают увеличение предельной деформации ползучести $p^* = p(t^*)$ с ростом напряжения σ_0 . Эта особенность характеризует качественно различный характер деформирования и разрушения материала при одной и той же температуре в зависимости от приложенного напряжения σ_0 . Низкий уровень напряжений, обуславливающий длительное деформирование до разрушения, характеризуется развитием процесса поро- и трещинообразования на границе зерен, охрупчиванием и последующим межзеренным разрушением. При больших напряжениях, соответствующих относительно малой длительности t^* , в большей степени наблюдается развитие необратимых сдвиговых деформаций ползучести, связанных по-видимому с переползанием дислокаций, при этом количество пор и микротрещин относительно невелико. Именно изменением приоритетного механизма длительного разрушения обычно объясняется наличие излома на кривой длительной прочности в логарифмических координатах $\lg \sigma_0 - \lg t^*$.



Фиг. 4

На фиг. 2 приведены кривые ползучести $p(t)$ и $p_R(t)$, построенные с использованием соотношений (4.3). При всех значениях σ_0 зависимость $p_R(t)$ возрастает быстрее, чем $p(t)$. Анализ экспериментальных данных показал, что при достаточно высоких напряжениях (из рассматриваемого диапазона), когда ползучесть происходит в основном за счет сдвиговых деформаций, превышение деформации $p_R(t)$ над $p(t)$ относительно невелико. Различие этих кривых возрастает при меньших напряжениях, для которых характерны раннее развитие пор и трещин вдоль межзеренных границ, охрупчивание и последующее межзеренное разрушение.

Рассмотрим результаты испытаний образцов II серии. В качестве примера рассмотрим подробнее испытания двухступенчатых образцов №№ 9–11. В одной части этих образцов действует начальное напряжение $\sigma_0 = 40$ МПа, а во второй части — $\sigma_0 = 50$ МПа. Анализ результатов испытаний показывает, что электрическое сопротивление $R(t)$ образцов II серии хорошо согласуется с суммой величин $R_1(t)$ и $R_2(t)$, измеряемых на образцах I серии. Удлинения отдельных частей образцов №№ 9–11 при их разрушении, определяемые на основе испытаний образцов I серии, должны составлять 6.0 и 1.8 мм; из табл. 2 следует, что средние реальные значения этих удлинений составили 6.4 и 1.8 мм. Таким образом, измерение электросопротивления в процессе испытаний на ползучесть позволяет с достаточной степенью точности определять деформации ползучести в образцах постоянного и переменного сечений.

5. Металлографическое исследование структуры образцов. Для исследования структуры испытанных образцов проводилось их разрезание в средней части каждой ступени по осевому сечению с целью приготовления микрошлифов. Травление

микрошлифов производилось в реактиве следующего состава: 50 мл воды, 50 мл аммиака и 5 мл пергидроля. Анализ структуры микрошлифов после их травления проводился с помощью оптического микроскопа. Микроструктура образцов после отжига перед испытаниями состоит из крупных равноосных зерен без пор и микротрещин, средний размер зерна материала составляет $d = 0.096$ мм. В исходном материале имеются в незначительном количестве двойники отжига, включения примесей не обнаружены.

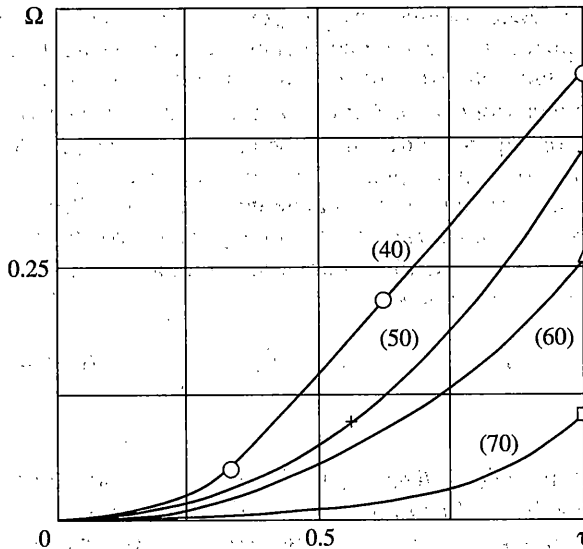
Предварительно рассматривалась структура образца, разрушенного при $T = 400^\circ\text{C}$ в условиях кратковременного растяжения. Вдоль продольного осевого сечения этого образца микротрещины и поры отсутствуют как на границах зерен, так и внутри их, следы полос скольжения присутствуют только в отдельных зернах, а разрушение проходит по зерну. Зерна в области однородного деформирования равномерно вытянуты в направлении растяжения, в некоторых зернах есть следы полос скольжения, в районе шейки и в месте излома произошло измельчение зерен.

После испытания образцов на ползучесть в них обнаружены микротрещины в большом количестве, а в некоторых – и поры. Микротрещины, как правило, перпендикулярны оси растяжения. Микротрещины и поры расположены по границам зерен, с увеличением напряжения количество микротрещин и их размеры уменьшаются. Излом образцов смешанный: по зерну и по границам зерен. Во всех образцах имеются утолщенные границы зерен. Почти все микротрещины образованы в тройной точке (на границах зерен). У образцов II серии характерной особенностью микроструктуры неразрушенных ступеней является наличие большого количества микропор по границам зерен.

Для количественного определения поврежденности материала испытанных образцов на каждом микрошлифе выбиралась поперечная дорожка в форме прямоугольника, у которого одна сторона совпадала с диаметром D образца, а другая (вдоль оси образца) имела произвольный размер H . Сумма длин всех поперечных межзеренных границ внутри прямоугольной дорожки, перпендикулярных направлению растяжения, составляет HD/d . Вычислим величину a – сумму длин проекций всех микротрещин на направление диаметра образца. Под поврежденностью Ω понимается отношение суммарной длины поперечных границ между зернами, занятых порами и микротрещинами, к длине всех поперечных границ между зернами $\Omega = ad/HD$.

Так как микрошлифы свидетельствуют о равномерном распределении микротрещин и пор вдоль радиальной координаты, то определенная указанным выше способом относительная трещиноватость Ω диаметра образца совпадает с относительной трещиноватостью площади круглого поперечного сечения. На фиг. 5 результаты анализа структуры всех испытанных образцов обеих серий представлены в виде зависимости средних значений Ω от относительного времени $\tau = t/t^*$ образцов под нагрузкой. Особый интерес представляют уровень поврежденности при разрушении Ω^* и характер зависимости этой предельной поврежденности от номинального напряжения σ_0 . Средние значения Ω^* для образцов обеих серий приведены в табл. 1. На фиг. 4 дополнительно к зависимостям $t^*(\sigma_0)$ и $\omega^*(\sigma_0)$ приведена в полулогарифмических координатах зависимость средних значений Ω^* (по всем испытанным образцам) от σ_0 , она также имеет монотонно убывающий характер. Следует заметить, что обе меры предельной поврежденности структуры ω^* и Ω^* , измеряемые совершенно разными способами, почти во всем диапазоне изменения напряжения σ_0 можно считать пропорциональными.

Из фиг. 4 следует, что все три зависимости $\lg t^*(\lg \sigma_0)$, $\omega^*(\lg \sigma_0)$ и $\Omega^*(\lg \sigma_0)$, аппроксимируемые в виде ломаных, характеризуются изломами при одном и том же значении напряжения $\sigma_0 = 56$ МПа. Это обстоятельство подчеркивает, что в рассматриваемом диапазоне исследуемых напряжений $\sigma_0 = 40\text{--}70$ МПа можно выделить уча-



Фиг. 5

стки с преимущественным межзеренным разрушением ($\sigma_0 = 40\text{--}56$ МПа) и с преимущественным внутризеренным разрушением (56–70 МПа).

6. Аналитическое описание процессов ползучести и накопления поврежденности.

При описании процесса ползучести вплоть до разрушения Ю.Н. Работнов [2] предложил ввести структурный параметр $\omega(t)$ в уравнение ползучести, при этом он пренебрегал упругой и пластической деформациями по сравнению с деформацией ползучести, а также не учитывал поврежденность материала, вызываемую его мгновенным нагружением. В работе Броберга [23] приведено обобщение этого подхода с целью учета мгновенной деформации и поврежденности материала при мгновенном нагружении. В [24] показано, что вытекающее из этих уравнений условие длительной прочности при чистом растяжении определяется не значением $\omega^* = \omega(t^*) = 1$, а временем, при котором скорость увеличения вводимого авторами эффективного напряжения s стремится к бесконечности; при этом предельное значение ω^* поврежденности материала остается конечным и меньшим 1. В [12, 25] показано, что из уравнений Броберга, так же как и из приведенных в пп. 4, 5 экспериментальных данных, следует монотонное убывание предельного значения поврежденности ω^* с увеличением σ_0 .

Проведем анализ приведенных в пп. 4, 5 экспериментальных данных с позиций подхода Броберга [23]. В [23] вводится так называемое эффективное напряжение $s(t)$ и устанавливается зависимость деформации ε и поврежденности ω от s . При этом деформация $\varepsilon_0 = \varepsilon(t = +0)$ и поврежденность $\omega_0 = \omega(t = +0)$ при мгновенном нагружении связаны с эффективным напряжением s_0 ($s_0 = s(t = +0)$) следующим образом:

$$\varepsilon_0 = G(s_0) = G_0, \quad \omega_0 = g(s_0) = g_0 \tag{6.1}$$

а процесс ползучести до разрушения определяется системой двух дифференциальных уравнений

$$\dot{\varepsilon} = G'(s)\dot{s} + H(s), \quad \dot{\omega} = g'(s)\dot{s} + h(s) \tag{6.2}$$

Точка в (6.2) и всюду ниже означает дифференцирование по времени t , а штрих – по эффективному напряжению s . Из первого уравнения (6.2) следует, что оно описывает только ускоряющийся участок кривой ползучести (вследствие монотонно возрастающего характера функций $G'(s)$, \dot{s} и $H(s)$). Фиг. 1, 2 показывают, что в данных испытаниях наблюдается продолжительный участок установившейся ползучести материала. Вследствие этого для адекватного описания экспериментальных кривых ползучести следует модернизировать уравнение Броберга. Заменяем в (6.2) функции $H(s)$ и $h(s)$ на $H_0 = H(s_0)$ и $h_0 = \dot{h}(s_0)$, кроме того, учтем, что согласно определению ω (3.6) поврежденность в начальный момент времени равна нулю. В результате уравнения (6.1), (6.2) примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= G'(s)\dot{s} + H(s_0), & \dot{\omega} &= g'(s)\dot{s} + h(s_0), & \varepsilon(+0) &= \varepsilon_0 = G(s_0) = G_0, \\ \omega(0) &= \omega_0 = 0 \end{aligned} \quad (6.3)$$

Будем считать функции $G'(s)$, $H(s_0)$, $g'(s)$ и $h(s_0)$ положительными, непрерывными и монотонно возрастающими. Если при малых значениях времени t первые слагаемые в правых частях уравнений (6.3) значительно меньше вторых слагаемых, то при этих условиях уравнения (6.3) с достаточной степенью точности описывают линейный характер зависимостей $\varepsilon(t)$ и $\omega(t)$.

При учете несжимаемости материала логарифмическая деформация (4.1) принимает вид

$$\varepsilon = \ln(l/l_0) = \ln(F_0/F) \quad (6.4)$$

Параметр поврежденности $\bar{\omega}$ в [24] определяется следующим образом:

$$\bar{\omega} = \ln[F/(F - F_\omega)] \quad (6.5)$$

где F_ω – площадь пустот различного типа (трещины, поры и т.д.). Будем считать, что параметр поврежденности $\bar{\omega}(t)$ и измеряемый с помощью учета изменения электрического сопротивления параметр поврежденности ω пропорциональны, т.е. $\bar{\omega}(t) = K\omega(t)$ где $K = \text{const}$.

Рассмотрим растяжение образца постоянной силой P с учетом больших деформаций. Определим эффективное напряжение s [24]:

$$s = \frac{P}{(F - F_\omega)} = \frac{P F_0}{F_0 F (F - F_\omega)} = \sigma_0 \exp(\varepsilon + K\omega) \quad (6.6)$$

В результате приложения силы P в образце согласно (6.3)–(6.6) при $t = +0$ возникает эффективное напряжение

$$s_0 = \sigma_0 \exp G_0 \quad (6.7)$$

Таким образом, при $t = +0$ в образце в результате действия растягивающей силы возникают мгновенная деформация G_0 и истинное напряжение s_0 , связанные с номинальным напряжением σ_0 с помощью уравнения (6.7).

Рассмотрим анализ системы двух дифференциальных уравнений (6.3), дополненных конечным уравнением (6.7). Дифференцируя (6.6) по времени и используя (6.3), получаем:

$$\dot{s}/s = (\dot{\varepsilon} + K\dot{\omega}) = (G' + Kg')\dot{s} + (H_0 + Kh_0)$$

отсюда получаем

$$\dot{s} = \frac{H_0 + Kh_0}{(1/s - G' - Kg')} \quad (6.8)$$

Из (6.8) следует, что зависимость $s(t)$ истинного напряжения от времени определяется следующим образом:

$$t = \frac{1}{(H_0 + Kh_0)} \int_{s_0}^s \left(\frac{1}{s} - G' - Kg' \right) ds \quad (6.9)$$

Зависимости нарастания полной деформации $\epsilon(t)$, деформации ползучести $p(t)$ и поврежденности $\omega(t)$ от времени определяются через параметр s (при учете (6.3)):

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= G(s(t)) + H(s_0)t, & p(t) &= G(s(t)) - G(s_0) + H(s_0)t \\ \omega(t) &= g(s(t)) - g(s_0) + h(s_0)t \end{aligned} \quad (6.10)$$

Естественно, что эффективное напряжение $s(t)$ при растяжении образца монотонно возрастает, $\dot{s}(t) > 0$. Числитель (6.8) при любом t является положительной величиной. Выражение в знаменателе (6.8) монотонно убывает со временем до нуля. Значение t , при котором знаменатель (6.8) обращается в нуль, принимается за время разрушения образца $t = t^*$. Из (6.9) следует зависимость $s(t)$, из условия $\dot{s} \rightarrow +\infty$ определено значение s^* в момент разрушения:

$$\left(\frac{1}{s} - G' - Kg' \right) \Big|_{s=s^*} = 0 \quad (6.11)$$

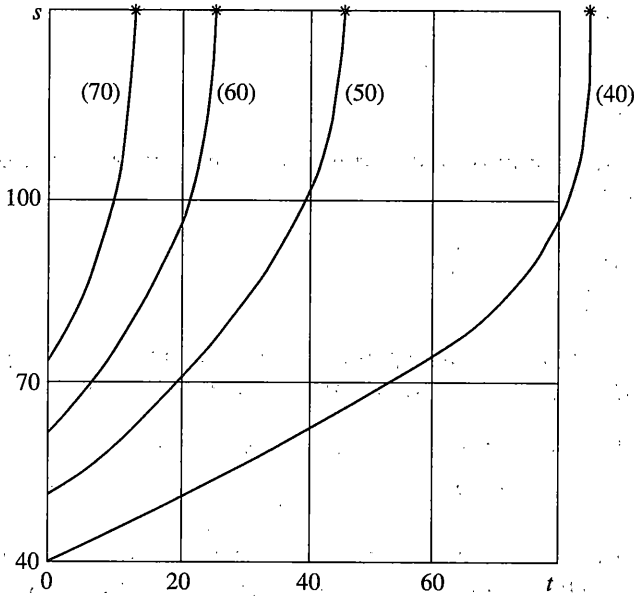
Проведем анализ этого условия. Согласно (6.11) предельное значение s^* эффективного напряжения определяется только видом функций $G'(s)$ и $g'(s)$, характеризующих поведение материала при мгновенном нагружении, и не зависит от величины номинального напряжения σ_0 . С помощью (6.9), (6.10) можно определить время разрушения t^* и соответствующие моменту разрушения значения $\epsilon^* = \epsilon(t^*)$, $p^* = p(t^*)$ и $\omega^* = \omega(t^*)$:

$$\begin{aligned} t^* &= \frac{1}{(H_0 + Kh_0)} \int_{s_0}^{s^*} \left(\frac{1}{s} - G' - Kg' \right) ds, & \epsilon^* &= G(s^*) + H(s_0)t^* \\ p^* &= G(s^*) - G(s_0) + H(s_0)t^*, & \omega^* &= g(s^*) - g(s_0) + h(s_0)t^* \end{aligned}$$

При анализе полученных экспериментальных данных с помощью рассмотренной модели вначале определим значения предельного эффективного напряжения s^* и коэффициента K . Из (6.6) следует $s^* = \sigma_0 \exp(\epsilon^* + K\omega^*)$. В результате осреднения экспериментальных данных получим $s^* = 130$ МПа, $K = 10.5$.

Из (6.7) следует $s_0 = \sigma_0 \exp \epsilon_0$, т.е. начальные значения s_0 в рассматриваемом диапазоне величин σ_0 (40–70 МПа) равны соответственно 40.5, 50.9, 61.7 и 73.3. При анализе приведенных в п.4 экспериментальных данных были использованы степенные функции:

$$H(s_0) = H_0 = A_1 s_0^{n_1}, \quad h(s_0) = h_0 = A_2 s_0^{n_2}, \quad G'(s) = A_3 s^{n_3}, \quad g'(s) = A_4 s^{n_4}$$



Фиг. 6

В этом случае зависимость эффективного напряжения s от времени, кривые ползучести $p(t)$ и зависимости поврежденности ω от времени согласно (6.9), (6.10) описываются следующими уравнениями:

$$t(s) = \frac{1}{(A_1 s_0^{n_1} + K \cdot A_2 s_0^{n_2})_{s_0}} \int_{s_0}^s \left[\frac{1}{s} - A_3 s^{n_3} - K A_4 s^{n_4} \right] ds$$

$$p(s(t)) = \frac{A_3}{(n_3 + 1)} [s^{(n_3 + 1)} - s_0^{(n_3 + 1)}] + A_1 s_0^{n_1} t$$

$$\omega(s(t)) = \frac{A_4}{(n_4 + 1)} [s^{(n_4 + 1)} - s_0^{(n_4 + 1)}] + A_2 s_0^{n_2} t$$

В расчетах были использованы следующие значения материальных констант: $n_1 = 4.3$, $n_2 = 1.17$, $n_3 = 5$, $n_4 = 2$, $A_1 = 6.3 \cdot 10^{-11}$ (МПа)^{-4.3} час⁻¹, $A_2 = 1.3 \cdot 10^{-5}$ (МПа)^{-1.17} час⁻¹, $A_3 = 10^{-13}$ (МПа)⁻⁶, $A_4 = 2.2 \cdot 10^{-8}$ (МПа)⁻³. Аналитические зависимости $p(t)$, $\omega(t)$ и $s(t)$ при четырех значениях приложенного начального напряжения $\sigma_0 = 40, 50, 60$ и 70 МПа приведены соответственно на фиг. 1, 3, 6 (t [час], s [МПа]). Вблизи этих кривых в скобках указаны значения σ_0 . Из фиг. 1, 3 следует, что модифицированная модель Броберга (6.3) позволяет получить соответствие экспериментальных и теоретических зависимостей деформаций ползучести и поврежденности от времени.

7. Заключение. Разработан метод определения поврежденности структуры металлов, накапливающейся при высокотемпературной ползучести, который основан на из-

мерении электросопротивления образцов. Совместное рассмотрение кривых ползучести, построенных на основе измерения деформации образца и измерения его электросопротивления, позволяет установить момент начала активного процесса образования и развития пор и микротрещин. Представлены экспериментальные зависимости поврежденности от времени, полученные в результате обработки опытных данных с помощью предложенного метода. Приведены результаты измерения поврежденности тех же образцов, полученной с помощью металлографического метода. Оба метода измерения показывают, что поврежденность материала при разрушении является монотонно убывающей функцией от напряжения, приведена интерпретация полученных результатов. Рассмотрен вариант кинетической теории ползучести и длительной прочности (основанный на модификации подхода Броберга), с помощью которого получены аналитические зависимости деформаций ползучести и поврежденности от времени. Эти зависимости отражают основные особенности экспериментальных данных.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 05-01-00226) и ИНТАС (№ 03-51-6046).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качанов Л.М. О времени разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. ОТН. 1958. № 8. С. 26–31.
2. Работнов Ю.Н. О механизме длительного разрушения // Вопросы прочности материалов и конструкций. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 5–7.
3. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
4. Perry A.J. Review cavitation in creep // J. Mater. Sci. 1974. V. 9. P. 1016–1039.
5. Грант Н. Разрушение в условиях высокотемпературной ползучести // Разрушение. М.: Мир, 1976. Т. 3. С. 538–578.
6. Березина Т.Г., Трунин И.И. Взаимодействие предельно допустимой деформации ползучести с поврежденностью материала паропроводов // Металловедение и термическая обработка металлов. 1980. № 12. С. 34–37.
7. Dyson B.F., Taplin D.M.R. Creep damage accumulation // Grain Bound. Inst. Met. Spring Resident. Conf. 1976. Ser. 3. № 5. London, s.a. E/23-E/28.
8. Horiguchi M., Kawasaki T. Длительная прочность нержавеющей сталей при высоких температурах // Нихон дзайрё кёдо гаккайси. J. Jap. Soc. Strength and Fract. Mat. 1977. V. 12. № 1. P. 34–43 (япон.).
9. Riedel H. The extension of a macroscopic crack at elevated temperature by the growth and coalescence of microvoids // Creep in structures: Proc. 3rd IUTAM Symp., Leicester, 1980. Berlin etc., 1981. P. 504–515.
10. Leckie F.A., Hayhurst D.R. Constitutive equations for creep rupture // Acta Met. 1977. V. 25. P. 1059–1070.
11. Maruyama T., Nosaka T. Оценка повреждений при ползучести с помощью наблюдения пустот в сплавах, полученных методом центробежного литья // Дзайрё, J. Soc. Mater. Sci., Jap. 1979. V. 28. № 308. P. 372–378 (япон.).
12. Локощенко А.М. Исследование поврежденности материала при ползучести и длительной прочности // ПМТФ. 1982. № 6. С. 129–133.
13. Нигматулин Р.И., Холин Н.Н. Дислокационная кинетика сверхпластичности и ползучести металлов // Докл. АН СССР. 1976. Т. 231. № 2. С. 303–306.
14. Estrin Y., Mecking H. A unified phenomenological description of work hardening and creep based on one-parameter models // Acta met. 1984. V. 32. № 1. P. 57–70.
15. Розенберг В.М., Шалимова А.В., Зверева Т.С. Влияние температуры и напряжений на образование пор при ползучести // Физика металлов и металловедение. 1968. Т. 25. Вып. 2. С. 326–332.
16. Cane V.J. Deformation induced intergranular creep cavitation in alpha-iron // Metal Sci. 1978. V. 12. № 2. P. 102–108.

17. Гойхенберг Ю.Н., Березина Т.Г., Ашихмина Л.А., Ерагер С.И., Щербакова А.Ф. Исследование разрушения теплоустойчивых сталей в процессе ползучести // Сб. науч. тр. Челяб. политехн. ин-та. 1979. Т. 89. № 229. С. 72–77.
18. Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Петров А.И. Особенности микроразрушения металлов при высокотемпературной ползучести // Металловедение и термическая обработка металлов. 1980. № 12. С. 24–26.
19. Арутюнян Р.А. О взаимосвязи реологии и разрушения полимерных материалов // Механика композит. материалов. 1983. № 4. С. 583–585.
20. Куманин В.И., Грунин И.И., Богомольная Р.Б. Изучение процесса накопления повреждаемости в условиях высокотемпературной ползучести // Научн. тр. ВЗМИ. 1973. Т. 1. С. 55–65.
21. Belloni G., Bernasconi G. Creep damage models // Creep Eng. Mater. and Structure. Proc. Semin. Ispra (Varese), 1978; London, 1979. P. 195–227.
22. Шестериков С.А., Локощенко А.М., Мякотин Е.А. О применении метода измерения электросопротивления при исследовании прочности и ползучести металлов // Проблемы прочности. 1984. № 10. С. 32–35.
23. Broberg H. A new criterion for brittle creep rupture // Trans. ASME. Ser. E. J. Appl. Mech. 1974. V. 41. № 3. P. 809–811.
24. Bostrom P.O., Broberg H., Brathe L., Chrzanowski M. On failure conditions in viscoelastic media and structures // Intern. Symp. on Mechanics of Viscoelastic Media and Bodies, Gothenburg, 1974. Springer, Berlin: 1975. P. 302–311.
25. Дачева М.Д., Локощенко А.М., Шестериков С.А. Модельное представление предельной деформации при ползучести // ПМТФ. 1984. № 4. С. 139–142.

Москва

Поступила в редакцию
10.09.2004