

8. Годунов С. К., Дерибас А. А. и др. Исследование вязкости металлов при высокоскоростных соударениях. — ФГВ, 1971, т. 7, № 1.
9. Фадеев Ю. И. Временные критерии разрушения взрывом. — ПМТФ, 1977, № 6.
10. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974.
11. Ивлев Д. Д. Теория идеальной пластичности. М.: Наука, 1966.

УДК 539.4; 539.376

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МАТЕРИАЛА ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ

· А. М. Локощенко

(Москва)

В рамках механики сплошной среды для описания процессов ползучести металлов часто исходят из предложенной в [1] концепции механического уравнения состояния с системой кинетических уравнений для определения параметров q_i , характеризующих рассматриваемое состояние:

$$(1) \quad \dot{p} = \dot{p}(\sigma, T, q_1, q_2, \dots, q_n);$$

$$(2) \quad dq_j = a_j d\sigma + b_j dT + c_j dt, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Согласно (1), скорость ползучести определяется напряжением σ , температурой T и некоторым числом структурных параметров q_j . Уравнения (2) представляют собой в общем случае неинтегрируемые кинетические соотношения для описания изменения параметров q_j , которое в свою очередь характеризует изменение структуры материала (a_j, b_j, c_j — некоторые функции от σ, T, t , а также от q_j). Для того чтобы описать хотя бы некоторые качественные особенности длительной прочности металлов, для простоты чаще всего вводят один структурный параметр ω и принимают его за некоторую меру поврежденности материала. При решении задач ползучести и длительной прочности обычно либо физический смысл параметра ω не конкретизируется, либо под ω понимается относительная часть поврежденного в результате ползучести сечения образцов. Под временем разрушения $t = t^*$ часто понимают время, при котором поврежденность достигает единицы ($\omega^* = \omega(t^*) = 1$). В данной работе приведены результаты экспериментального исследования $\omega(t)$; показано, что $\omega^* < 1$, причем зависимость ω^* от напряжения носит монотонно убывающий характер; получено аналитическое описание этого эффекта.

Испытания образцов проведены в условиях действия постоянной растягивающей силы при температуре $T = 400^\circ\text{C}$. Все образцы изготовлены из одного медного стержня марки МЗ. Всего изготовлен 21 образец: 12 образцов I серии (с постоянным поперечным сечением) и 9 образцов II серии (с кусочно-постоянным сечением). Все образцы перед испытаниями были подвергнуты одновременному отжигу в вакууме ($1,3 \cdot 10^{-3}$ Па) в течение 2 ч при температуре 800°C и последующему охлаждению с печью. Под σ_0 всюду ниже понимается условное напряжение, равное отношению растягивающей силы к площади недеформированного сечения. Рассматриваемый материал при $T = 400^\circ\text{C}$ характеризуется существенной нелинейностью мгновенных свойств, предел текучести $\sigma_{0s} \approx 30$ МПа, предел прочности $\sigma_{0n} = 120$ МПа. Испытания проводились при напряжениях $\sigma_0 = 40; 50; 60; 70$ МПа.

Образцы I серии (с рабочей длиной 50 мм и начальным диаметром от 4,27 до 5,65 мм) испытывались на установке ИМех-5, укомплектованной щитом управления для автоматического регулирования и записи температуры по термопаре, установленной на образце. Температура поддерживалась постоянной с точностью $\pm 3^\circ\text{C}$. В табл. 1 приведены результаты испытаний этих образцов (римские цифры в скобках — серия образца).

Таблица 1

Номер образца	σ_0	t^*	ω^*
2(I)	40	68,0	0,339
3(I)	40	66,5	0,534
4(I)	50	40,0	0,207
5(I)	50	37,0	0,252
7(I)	60	24,0	0,126
8(I)	60	28,0	0,371
10(I)	70	11,75	0,177
11(I)	70	11,5	0,039

Во всех таблицах значения σ_0 приведены в меганаскалях, а t^* — в часах.

Образцы II серии имеют две, три или четыре ступени вдоль образующей. Образцы 1 (II)—3(II) характеризуются двумя участками постоянного сечения, образцы 7(II)—9(II) — тремя участками, образцы 4(II)—6(II) — четырьмя участками. Величины диаметров различных ступеней образцов II серии подобраны таким образом, чтобы при растяжении силой 100 кг напряжение σ_0 на каждой ступени было равно одному из значений $\sigma_0 = 40; 50; 60; 70$ МПа. Суммарная рабочая длина каждого образца II серии составляет 80 мм, так что рабочие длины различных ступеней изменяются от 20 до 40 мм.

Испытания образцов II серии на длительную прочность проводились на многообразцовой установке ДР-9 [2], укомплектованной высокотемпературной печью. Испытывались цепочки из трех последовательно соединенных образцов. Конструкция установки такова, что разрушение некоторых образцов цепочки не препятствует продолжению испытаний оставшихся образцов в той же цепочке. Контрольные термометры крепились непосредственно к образцу, а регулирующие термометры — к внешней стороне захватов в области образца. Образцы, находившиеся в верхней (1(II)—3(II)) и средней (7(II)—9(II)) зонах печи, испытывались при температуре 400°C с точностью +3°C; средняя температура образцов 4(II)—6(II), находившихся в нижней зоне печи, составляла 385°C. В связи с этим время разрушения образцов 4(II)—6(II) несколько выше, чем у образцов I серии 10(I)—11(I), испытанных при том же напряжении $\sigma_0 = 70$ МПа. Времена разрушения всех образцов II серии, испытывавшихся при $T = 400^\circ\text{C}$, хорошо согласуются с временами разрушения образцов I серии, испытанных при тех же значениях T и σ_0 . Результаты экспериментов на образцах II серии приведены в табл. 2. Для характеристики номера ступени образца используется параметр i , большему значению i соответствует большее значение диаметра ступени и соответственно меньшее значение напряжения σ_0 . В связи с этим разрушение всегда наступает на I ступени ($i = 1$).

В табл. 3 приведены средние значения t^* , полученные по результатам испытаний всех образцов при $T = 400^\circ\text{C}$ на обеих установках. Характеристики длительной прочности используемого материала хорошо аппроксимируются в полулогарифмических координатах ($\sigma_0 - \log t^*$) прямой линией, а в двойных логарифмических координатах ($\log \sigma_0 - \log t^*$) — ломаной с точкой излома внутри рассматриваемого диапазона напряжений (при $\sigma_0 = 56$ МПа). Для каждой ступени образцов в табл. 2 приведено значение безразмерного времени τ , равного отношению реального вре-

Таблица 2

Номер образца	T°, C	t^*	$i=1$			$i=2$			$i=3$			$i=4$		
			σ_0	τ	ω	σ_0	τ	ω	σ_0	τ	ω	σ_0	τ	ω
1(II)		42			0,485			0,229						
2(II)	400	40	50	1	0,503	40	0,62	0,324	—	—	—	—	—	—
3(II)		43			0,376			0,108						
4(II)		19			0,222			0,061			0,053			0,043
5(II)	385	23	70	<1,81	0,230	60	<0,90	0,168	50	<0,52	0,054	40	<0,31	0,018
6(II)		21			0,145			0,088			0,046			0,033
7(II)		20			0,201			0,090			0,052			
8(II)	400	25	60	1	0,408	50	0,55	0,083	40	0,33	0,090	—	—	—
9(II)		21			0,209			0,122			0,004			

мени действия напряжения σ_0 на данной ступени к времени $t^*(\sigma_0)$, в течение которого материал может выдерживать данное напряжение.

Металлографическое исследование образцов проводилось на микрошлифах, вырезанных из средней части каждой ступени по осевому сечению. Травление микрошлифов производилось в реактиве следующего состава: 50 мл воды, 50 мл аммиака и 5 мл пергидроля. В исходном состоянии после отжига образцы имеют структуру равноосных зерен без пор и микротрещин. Средний диаметр D зерен исходной структуры составляет 0,096 мм. На микрошлифах образцов I серии, а также на микрошлифах разрушенных ступеней ($i = 1$) образцов II серии в большом количестве обнаружены микротрещины, а в некоторых случаях — и поры. Микротрещины расположены по границам зерен, при этом они в основном перпендикулярны направлению приложенного напряжения. Внутриверенные трещины практически отсутствуют. У образцов II серии на неразрушенных ступенях ($i > 1$) размеры микротрещин значительно меньше, чем на первой ступени. Характерной особенностью микроструктуры неразрушенных ступеней является наличие большого количества микропор по границам зерен.

Для количественного определения поврежденности материала 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 межзеренных границ, перпендикулярных направлению растяжения, составляет Hd/D (где D — размер зерна образца). Вычислим величину a — сумму длин проекций всех микротрещин на направление диаметра образца. В качестве меры поврежденности ω примем отношение суммарной длины поперечных границ, занятых порами и микротрещинами, к длине всех поперечных границ между зёрнами: $\omega = aD/Hd$. Так как микрошлифы свидетельствуют о равномерном распределении микротрещин и пор вдоль радиальной координаты микрошлифов, то определенная указанным выше способом относительная трещиноватость ω диаметра образца совпадает с относительной трещиноватостью площади круглого поперечного сечения. В табл. 1, 2 указаны значения поврежденности ω для всех ступеней испытанных образцов, в табл. 3 — средние значения поврежденности ω^* , соответствующей моменту разрушения. На фигуре нанесены кривые зависимости поврежденности ω от относительного времени τ образца под нагрузкой (линии 1—4 соответствуют $\sigma_0 = 40; 50; 60; 70$ МПа). Табл. 3 и фигура показывают, что зависимость $\omega^*(\sigma_0)$ имеет монотонно убывающий характер. С точки зрения структуры материала такое явление можно объяснить следующим образом. При малых напряжениях ползучесть сопровождается развитием процесса поро- и трещинообразования по границам зерен и последующим межзеренным разрушением. При больших напряжениях разрушение наступает в результате развития необратимых сдвиговых деформаций ползучести, связанных, по-видимому, с переползанием дислокаций, при этом количество пор и трещин относительно невелико.

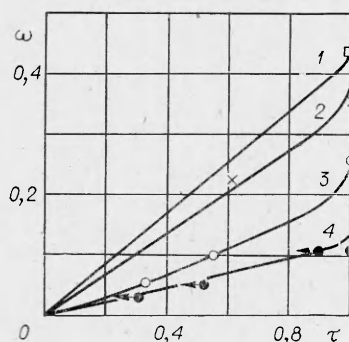
Перейдем к описанию этого явления с помощью феноменологического подхода. В [3] деформация ε при мгновенном нагружении связана с эффективным напряжением s , зависящим от параметра поврежденности ω :

$$\varepsilon = G(s), \quad \omega = g(s),$$

а процесс ползучести определяется системой двух дифференциальных уравнений

Т а б л и ц а 3

σ_0	t^*	ω^*
40	67,2	0,44
50	40,4	0,36
60	23,7	0,26
70	11,6	0,11



$$(3) \quad \dot{\varepsilon} = G'(s)\dot{s} + F(s), \quad \dot{\omega} = g'(s)\dot{s} + f(s),$$

точка означает (как и выше) дифференцирование по времени t , а штрих — по эффективному напряжению s . Входящие в (3) функции $G'(s)$, $F(s)$, $g'(s)$ и $f(s)$ будем считать непрерывными, монотонно возрастающими из начала координат. Так же, как и в [4], будем пользоваться следующими определениями ε и ω :

$$(4) \quad \varepsilon = \ln (l/l_0) = \ln (A_0/A), \quad \omega = \ln [A/(A - A_\omega)],$$

где l_0 и A_0 — длина и площадь поперечного сечения образца до приложения нагрузки; l и A — аналогичные величины в процессе деформирования; A_ω — средняя площадь пустот различного типа в сечении. При растяжении образца постоянной силой P эффективное напряжение, согласно (4), определяется следующим образом:

$$(5) \quad s = P/(A - A_\omega) = \sigma_0 \exp(\varepsilon + \omega), \quad \sigma_0 = P/A_0.$$

В начале процесса ползучести (при $t = +0$) в образце вследствие мгновенного приложения силы P возникает эффективное напряжение s_0 , определяемое с помощью (2), (5):

$$(6) \quad s_0 = \sigma_0 \exp(G_0 + g_0), \quad G_0 = G(s_0), \quad g_0 = g(s_0).$$

В [4] получена зависимость эффективного напряжения s от времени t , с помощью которой из условия $s \rightarrow +\infty$ определено значение s^* в момент разрушения:

$$(7) \quad \frac{1}{s^*} - G'^* - g'^* = \frac{1}{s^*} - \left. \frac{dG}{ds} \right|_{s=s^*} - \left. \frac{dg}{ds} \right|_{s=s^*} = 0.$$

Проведем анализ этого условия. Согласно (7), предельное значение эффективного напряжения s^* 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 (3), (5) можно определить соответствующее моменту разрушения значение $\omega^* = \omega(t^*)$:

$$(8) \quad \omega^* = g^* + \int_{s_0}^{s^*} \frac{(1/s - G' - g')f}{(F + f)} ds.$$

Рассмотрим зависимость предельного значения поврежденности ω^* от напряжения σ_0 . В выражении (8) от σ_0 зависит только нижний предел интегралов, причём $s_0(\sigma_0)$ — возрастающая функция. Все остальные входящие в (8) величины определяются свойствами материала и от напряжения σ_0 не зависят. Поэтому увеличение напряжения σ_0 приводит к уменьшению предельного значения поврежденности ω^* , соответствующего моменту разрушения образца. Таким образом, модель (3) позволяет описать полученное в результате металлографического анализа монотонное убывание предельной поврежденности ω^* от приложенного напряжения σ_0 .

Рассмотрим случай малых деформаций ($\varepsilon \ll 1$). Введем наиболее удобную форму для функции $g(s)$:

$$(9) \quad g(s) = Cs^m.$$

Определим форму монотонно убывающей зависимости $\omega^*(\sigma_0)$ в этом случае. Так как эффективное напряжение s при малых деформациях отличается от номинального напряжения σ_0 только за счет накопления поврежденности ω , то уравнение (5) принимает в этом случае следующую форму:

$$(10) \quad s = \sigma_0 \exp \omega.$$

Используя (7), (10), получаем

$$\omega^* = \ln (D_1/\sigma_0), \quad D_1 = (Cm)^{-1/m}.$$

Рассмотрим случай малых деформаций при другом определении эффективного напряжения:

$$(11) \quad s = \sigma_0 / (1 - \omega).$$

В этом случае (3), (11) приводят к следующей зависимости $\dot{\omega}(t)$:

$$(12) \quad \dot{s} = \frac{\sigma_0 \dot{\omega}}{(1 - \omega)^2}, \quad \dot{\omega} = \frac{f}{\left[1 - \frac{\sigma_0 g'}{(1 - \omega)^2} \right]}.$$

Предельное значение ω^* при степенной функции (9) в соответствии с (12) имеет вид

$$(13) \quad \omega^* = 1 - D_2 \sigma_0^{m/(m+1)}, \quad D_2 = (Cm)^{1/(m+1)}.$$

Таким образом, в случае малых деформаций определение эффективного напряжения в форме (10) или (11) приводит к монотонному убыванию $\omega^*(\sigma_0)$ в форме соответственно логарифмической или степенной зависимости. Из (13) следует, что $0 < \omega^* < 1$, т. е. разрушение при ползучести всегда наступает при неполном заполнении поперечного сечения трещинами.

Автор выражает благодарность Т. М. Аверьяновой, Л. И. Грязновой и В. И. Николаеву за помощь при проведении экспериментов.

Поступила 3 XI 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966.
2. Мякотин Е. А., Шестериков С. А. Установка на девять трубчатых образцов для исследования длительной прочности металлов в сложном напряженном состоянии. — В сб.: Деформирование и разрушение твердых тел. М.: Изд-во МГУ, 1977.
3. Broberg Н. A new criterion for brittle creep rupture. — Transactions of ASME, 1974, vol. E41, N 3.
4. Boström P. O., Broberg Н., Bräthe L., Chrzanowski M. On failure conditions in viscoelastic media and structures. — In: Int. Symposium on Mechanics of Viscoelastic Media and Bodies. Gothenburg. Berlin: Springer-Verlag, 1975.

УДК 539.374

ВАРИАНТ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ, ОСНОВАННЫЙ НА СДВИГОВОМ МЕХАНИЗМЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

А. М. Коврижных

(Новосибирск)

Определяющие соотношения теорий типа течения существенным образом зависят от выбора двух функций — функции нагружения и функции упрочнения, детальная конструкция которых не выявлена. Допускаемая свобода задания этих функций позволяет предполагать довольно разнообразные формы поверхности нагружения как регулярного, так и сингулярного типа.

Имеющиеся в настоящее время результаты экспериментальных исследований не находят достаточно полного отражения с позиции классических представлений в теории упрочняющегося пластического тела. Например, нагружения с постоянной интенсивностью напряжений приводят к значительному росту пластической деформации [1], что свидетельствует о несостоятельности классического закона течения, основанного на изотропно расширяющейся поверхности текучести Мизеса.

В данной работе предлагается экспериментально обоснованный вариант теории пластического течения, в котором за основу построения определяющих соотношений принимается макроскопический сдвиговой механизм деформирования, являющийся частным случаем механической модели материала [2] и опирающийся на экспериментальные наблюдения за линиями Людерса. Такой подход не использует для построения определяющих соотношений понятие поверхности нагружения, но допускает интерпретацию в этой терминологии. В стадии упрочнения поверхность нагружения сингулярна и составлена из кусочно-гладких участков поверхностей постоянства