

когда нарушается сплошность и поры служат локальными источниками волн разгрузки, допущение о постоянстве растягивающего напряжения в зоне разрушения менее оправданно.

Найденные значения показателя в формуле (2) ( $n \ll 1$ ) не соответствуют лавино-подобному механизму роста повреждений, который представляется вероятным для случая, когда напряжение растяжения сохраняется постоянным в процессе разрушения, и для которого  $n > 1$  ( $\partial \Pi / \partial t \sim t^{n-1}$ ).

Поступила 5 III 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов Б. А. О временной зависимости прочности оргстекла при ударной нагрузке. Проблемы прочности, 1972, № 12.
2. Davison L., Stevens A. L. Continuum measures of spall damage. J. Appl. Phys. 1972, vol. 43, No. 3.

УДК 539.376

#### О РАЗРУШЕНИИ ВСЛЕДСТВИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ

*А. Ф. Никитенко, О. В. Соснин, Н. Г. Торшенов*

(Новосибирск)

Приведены результаты экспериментов на ползучесть до разрушения при плоском напряженном состоянии и показано, что сформулированный ранее [1] энергетический подход к оценке длительности процесса до разрушения подтверждается экспериментально.

В [1] для одноосного напряженного состояния показано, что диаграммы  $A = A(t)$ , где  $A = \int_0^t \sigma \eta dt$ ,  $\eta$  — скорость деформации ползучести, для различных уровней напряжений подобны и что длительности процессов ползучести до разрушения  $t^*$  сопоставимы по их величинам удельными мощностями рассеяния  $W^\circ = \sigma \eta$  на установившихся стадиях

$$(1) \quad W_k^\circ / W_n^\circ = t_n^* / t_k^*$$

Ниже представлены результаты для плоского напряженного состояния — растяжения с кручением и сжатия с кручением.

Эксперименты проводились при  $T = 275^\circ \text{C}$  на трубчатых образцах наружным и внутренним диаметрами соответственно 20 и 18 мм и длиной рабочей части 80 мм. Образцы изготавливались из пруткового материала Д16Т в состоянии поставки и после изготовления термообработке не подвергались. Из каждого прутка выбранной партии было изготовлено по два образца, которые испытывались на ползучесть при растяжении с целью сопоставления разброса результатов из-за возможной разнородности прутков. Так были отобраны прутки, для которых разброс экспериментальных данных по деформациям не выходил из полосы  $\pm 10\%$  среднего значения.

Эксперименты на ползучесть были проведены в четыре серии.

Первая серия состояла из экспериментов на растяжение, сжатие и кручение, причем в экспериментах с кручением величина касательного напряжения  $\tau$  определялась из соотношения  $M = \tau S R_0$ , где  $M$  — внешний крутящий момент,  $S$  — площадь сечения образца,  $R_0$  — средний радиус кольцевого сечения. Большинство экспериментов доводилось до непосредственного разрушения образца, некоторые из них прекращались, когда процесс ползучести резко интенсифицировался, что могло быть связано с потерей устойчивости при сжатии или кручении. (Проведенные контрольные эксперименты с остановкой на различных уровнях третьей стадии показали, что гофрообразование и овалность на образцах появляются в третьей стадии ползучести непосредственно перед разрушением.) В процессе эксперимента измерялось осевое удлинение образца и угол закручивания, по которым определялись осевые деформации  $\varepsilon$  и сдвиги  $\gamma$ , а на

установившихся участках соответственно и скорости деформации  $\eta = d\varepsilon / dt$ ,  $\theta = d\gamma / dt$ .

Следует отметить, что во всех экспериментах как этой серии, так и последующих начальная неустановившаяся стадия ползучести практически отсутствовала и процесс очень быстро выходил на установившийся участок с постоянной скоростью деформирования. К моменту перехода процесса в третью стадию величины осевых деформаций ползучести не превышали 1%, к моменту разрушения ~ 5%. В процессе эксперимента никаких поправок в нагрузку за счет изменения площади сечения образца не производилось. Это не могло не проявиться в некотором монотонном отклонении в сторону замедления процессов ползучести при сжатии, которое действительно и наблюдалось в третьей стадии.

Ранее [2] одним из авторов было показано, что материалы типа Д16Т при ползучести ведут себя одинаково как при растяжении, так и при сжатии. Дальнейшие исследования показали, что этот вывод справедлив только для умеренных интенсивностей процессов ползучести, продолжающихся десятки и сотни часов. Для кратковременных процессов наблюдается заметное опережение скорости деформирования при растяжении в сравнении со скоростями деформирования при сжатии одинаковыми напряжениями. Это расхождение нельзя объяснить изменением площади сечения образцов: тот же эффект наблюдался и в экспериментах с поправками в нагрузках из-за изменения площади сечения образца, пересчитываемой в процессе эксперимента из условия несжимаемости материала через каждый 0.3% осевой деформации. Аналогичные выводы можно встретить и в ряде других работ [3].

Эксперименты первой серии показали, что исследуемый материал Д16Т анизотропен и обладает небольшим различием в свойствах ползучести при растяжении и сжатии.

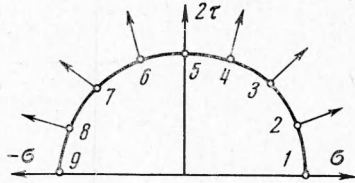
Полученные экспериментальные результаты позволили приблизительно оценить свойства ползучести материала и построить на плоскости напряжений  $\sigma$ ,  $\tau$  контур, в любой точке которого величина удельной мощности рассеяния  $W^{\circ} = \sigma\eta_0 + \tau\theta$  на установившейся стадии должна быть одна и та же. Уточнение геометрического места точек на плоскости  $\sigma$ ,  $\tau$  с постоянными значениями  $W^{\circ}$  осуществлялось экспериментально. Последующие три серии экспериментов преследовали цель определения трех контуров  $W^{\circ}(\sigma, \tau) = \text{const}$ , пересекающих положительную ось  $\sigma$  в точках  $\sigma_1 = 8 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\sigma_2 = 10 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\sigma_3 = 12 \text{ кг/мм}^2$ .

На фиг. 1 в осях  $\sigma$ ,  $\tau$  точками изображены напряжения, при которых в экспериментах было получено  $W_1^{\circ} \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/мм}^2 \cdot \text{час}$ . В табл. 1 показаны величины деформаций ползучести  $\varepsilon$  и  $\gamma$  для различных значений времени. Из приведенных в таблице данных видно, что отношение деформаций  $\varepsilon / \gamma$  в процессе эксперимента практически не меняется вплоть до разрушения образца. Стрелками на фиг. 1 отмечены направления результирующих приращений деформаций ползучести, которые построены на компонентах  $2\varepsilon$ ,  $\gamma$ , замедленных в соответствующих экспериментах.

Таблица 1

t, час	1		2		3		4		5		6		7		8		9	
	$\varepsilon \cdot 10^3$	$\gamma \cdot 10^3$	$\varepsilon \cdot 10^3$	$\gamma \cdot 10^3$	$\varepsilon \cdot 10^3$	$\gamma \cdot 10^3$	$\varepsilon \cdot 10^3$	$\gamma \cdot 10^3$	$\varepsilon \cdot 10^3$	$\gamma \cdot 10^3$	$\varepsilon \cdot 10^3$	$\gamma \cdot 10^3$	$\varepsilon \cdot 10^3$	$\gamma \cdot 10^3$	$\varepsilon \cdot 10^3$	$\gamma \cdot 10^3$	$\varepsilon \cdot 10^3$	$\gamma \cdot 10^3$
5	3.06	1.97	2.94	4.00	2.38	6.60	0.85	6.60	5.58	0.63	3.95	1.87	3.09	3.18	3.18	1.35	2.96	2.96
10	6.40	3.80	5.70	7.29	4.05	12.40	1.54	12.40	11.50	1.20	8.34	3.26	5.31	7.30	7.30	4.00	5.66	5.66
15	12.60	6.60	9.80	12.12	6.66	19.60	2.58	19.60	19.48	1.80	12.60	5.20	8.48	12.50	12.50	7.60	10.63	10.63
20	23.60	12.20	17.10	19.31	10.38	30.20	3.77	30.20	33.45	2.45	19.30	7.09	11.56	21.00	21.00	12.50	16.80	16.80
25	46.69	22.50	33.50	32.54	17.10	51.43	5.27	51.43	65.00	3.90	31.36	10.93	18.21	34.50	34.50	19.65	32.31	32.31
30	—	—	—	65.00	35.00	—	—	—	—	6.50	48.75	17.10	29.30	—	—	—	—	—

Указанные направления очень хорошо совпадают с направлениями нормали к контуру, проведенному через точки напряжений, где  $W^\circ(\sigma, \tau) = \text{const}$ , и, как уже отмечалось, эти направления не меняются вплоть до разрушения. Отсюда следует, что соотношение между компонентами скоростей деформаций ползучести и напряжениями (например, в форме подобия между соответствующими девиаторами



Фиг. 1

$$\eta_{kn} = \lambda \partial \sigma^i / \partial \sigma_{kn}, \quad \sigma_i^2 = 3/2 \sigma_{kn}^0 \sigma_{kn}^0$$

для изотропных материалов или в более общем виде

$$\eta_{kn} = \lambda \partial T / \partial \sigma_{kn}, \quad T^2 = a_{ijkl} \sigma_{ij} \sigma_{kl}$$

для некоторых форманизотропии материала), неоднократно проверенное экспериментально на первых стадиях ползучести, остается справедливым и в третьей стадии вплоть до разрушения.

Аналогичные результаты были получены и на двух других уровнях напряженных состояний, соответствующих значениям  $W_2^\circ \approx 15 \cdot 10^{-3}$  и  $W_3^\circ \approx 45 \cdot 10^{-3}$  кг/мм<sup>2</sup>·час.

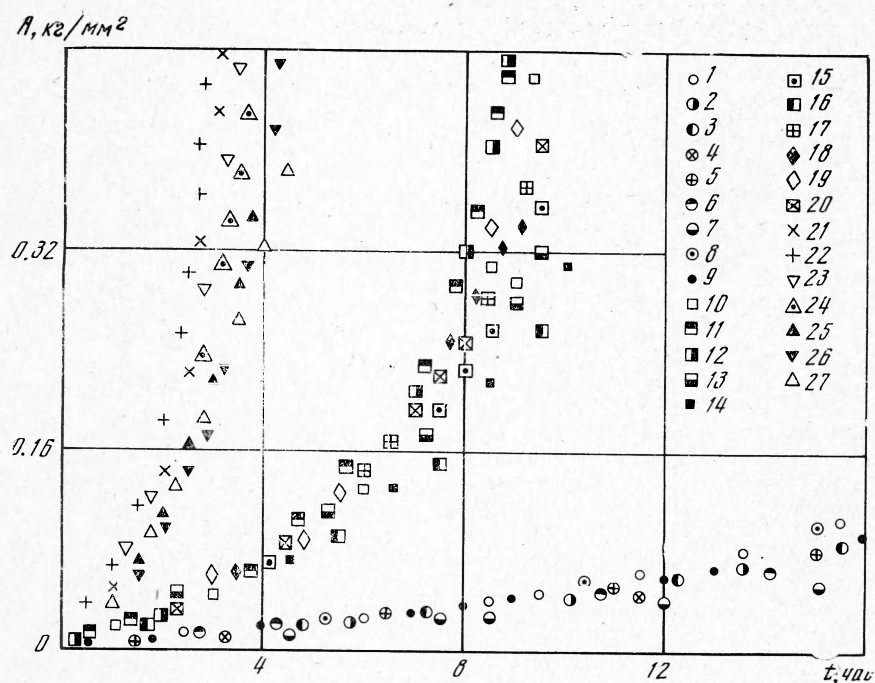
В табл. 2 приведены величины напряжений  $\sigma$  и  $\tau$  в кг/мм<sup>2</sup> и величины скоростей деформаций  $\eta \cdot 10^3$  и  $\theta \cdot 10^3$  час<sup>-1</sup>, соответствующих указанным выше трем значениям  $W^\circ = \text{const}$ .

Таблица 2

№№ экспериментов	$\sigma$	$\tau$	$\eta \cdot 10^3$	$\theta \cdot 10^3$	$W^\circ \cdot 10^3$
1	8.00	0	0.50	—	4.00
2	7.39	1.64	0.45	0.38	3.95
3	5.66	3.02	0.33	0.66	3.85
4	3.00	3.80	0.13	0.95	3.00
5	0	3.92	—	1.00	3.90
6	-3.00	3.80	-0.15	0.80	3.50
7	-5.87	2.75	-0.33	0.65	3.70
8	-7.67	1.46	-0.50	0.27	4.25
9	-8.30	0	-0.47	—	3.90
10	10.00	0	1.50	—	15.00
11	9.51	1.65	1.41	0.73	14.60
12	8.09	3.14	1.27	1.63	15.40
13	5.88	4.33	0.73	2.35	14.50
14	3.00	4.75	0.34	3.05	15.50
15	0	4.88	—	3.20	15.60
16	-3.20	4.78	-0.35	2.60	13.55
17	-8.40	2.87	-1.15	1.50	14.00
18	-9.60	1.79	-1.30	0.95	14.20
19	-9.87	1.49	-1.50	0.65	15.80
20	-10.38	0	-1.45	—	15.05
21	12.00	0	3.75	—	45.00
22	10.39	3.21	4.00	4.00	54.40
23	6.00	5.55	1.90	8.00	55.80
24	0	5.85	—	6.80	39.80
25	-6.15	5.15	-1.40	6.35	41.30
26	-10.79	2.92	-3.10	3.00	42.20
27	-12.46	0	-3.60	—	44.85

На фиг. 2 приведены результаты этих экспериментов в виде диаграмм  $A = A(t)$ , где  $A = \sigma \epsilon + \tau \gamma$ . Проставленные на фигуре цифры соответствуют номерам экспериментов из табл. 2. Из диаграмм видно, что средние длительности до разрушения при различных уровнях напряжений, соответствующих указанным выше значениям мощностей рассеяния, на установившихся стадиях  $t_1^* \approx 30$  час,  $t_2^* \approx 10$  час,  $t_3^* \approx 3$  час соответственно.

Из представленных здесь результатов можно сделать следующие выводы: поверхности эквивалентных в смысле длительности до разрушения напряженных состояний совпадают с поверхностями постоянных мощностей рассеяния при установившихся



Фиг. 2

стадиях ползучести  $W^{\circ} = \text{const}$ , а последние подобны поверхностям течения, форма которых не меняется вплоть до разрушения материала.

Зависимости (1), проверенные ранее экспериментально при одноосном нагружении [1], достаточно удовлетворительно подтверждаются и для случая сложного напряженного состояния.

Поступила 5 III 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Никитенко А. Ф., Соснин О. В. О разрушении при ползучести. ПМТФ, 1967, № 3.
2. Торшенин Н. Г. Ползучесть алюминиевого сплава Д16Т при сжатии. ПМТФ, 1966, № 6.
3. Яковлев В. В. Ползучесть при сжатии. Деформация и разрушение при термических и механических воздействиях, вып. 3. М., Атомиздат, 1969.