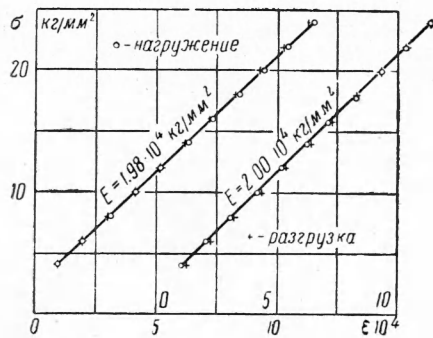


ПОЛЗУЧЕСТЬ ДУРАЛИЮМИНА ПРИ ПОСТОЯННЫХ И ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

В. С. Наместников, А. А. Хвостунков

(Новосибирск)

Данное исследование было направлено на изучение статических характеристик ползучести дуралюмина и экспериментальную проверку некоторых гипотез ползучести в условиях одноосного напряженного состояния при постоянных и переменных нагрузках. Выводы делаются на основе более 130 экспериментов, выполненных при 150 и 200° в широком диапазоне напряжений. Почти все опыты повторялись 3—40 раз. Продолжительность испытаний составляла около 100 час.



Фиг. 1

свободно опертыми кварцевыми стержнями [1]. Проверка измерительной системы, проведенная на углеродистой стали, дала хорошие результаты (фиг. 1).

Эксперименты проводились на круглых цилиндрических образцах диаметром 10 ± 0.01 мм и длиной рабочей части 100 ± 0.1 мм.

Максимальное радиальное биение середины рабочей части образца не превышало 0.05 мм.

Температура измерялась тремя термопарами, привязанными в средней и крайних точках рабочей длины образца. Применялись хромель-алюмелевые и хромель-копелевые термопары. Температура поддерживалась около заданной, с точностью $\pm 1-1.5^\circ$, а перепад температуры по длине рабочей части не превышал 1° .

Прогрев образцов до температуры испытания при 150° производился 3—4 часа, а при 200° — 1.5—2 часа, после чего температура стабилизировалась.

Нагружение образца производилось при 150° через 25 ± 4 часа, а при 200° — через 6 ± 2 часа с момента включения печи.

Приложение и снятие нагрузки осуществлялись плавно.

Измерения удлинения и температуры делались через 3, 6, 12, 30, 60 мин. с момента приложения нагрузки и затем через каждый час.

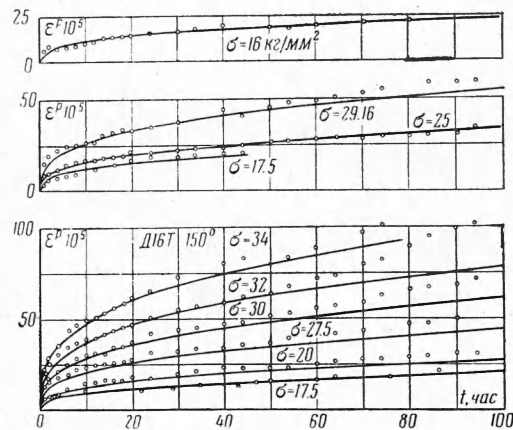
В качестве материала исследования был выбран дуралюмин Д16Т в состоянии поставки, т. е. закаленный и естественно состаренный. Материал поставлен в виде прутков диаметром 25 мм.

Был использован дуралюмин трех разных партий. В дальнейшем образцы первой партии нумеруются числами первой сотни, второй — второй сотни и третьей — третьей сотни. Твердость образцов каждой партии колебалась в пределах пяти единиц по Роквеллу (шкала В).

§ 1. Испытательные установки, материал и методика экспериментов. Эксперименты проводились на трех испытательных машинах на ползучесть ДСТ-5 и одной релаксационной установке Рел Ви-5, несколько реконструированных.

Перед проведением программы испытаний установки подвергались тщательной доводке и тарированию. Нагрузки прикладывались с точностью до 1%, а эксцентриситет приложения нагрузки не превышал 8% (за меру эксцентриситета принято отношение максимального напряжения к среднему по сечению образца).

Деформация измерялась микронным индикатором при помощи экстензометра со



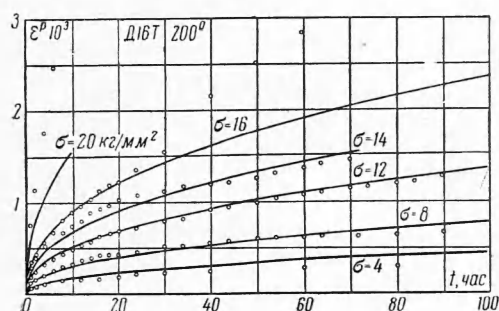
Фиг. 2

§ 2. Ползучесть при постоянных нагрузках. Рассмотрим результаты экспериментов при постоянных нагрузках. Поскольку в наших экспериментах полная деформация не превышала 0.7%, то можно считать, что при постоянной нагрузке напряжения также были постоянными. Напряжения, при которых проводились опыты, и количество испытанных при каждом напряжении образцов приведены в табл. 1.

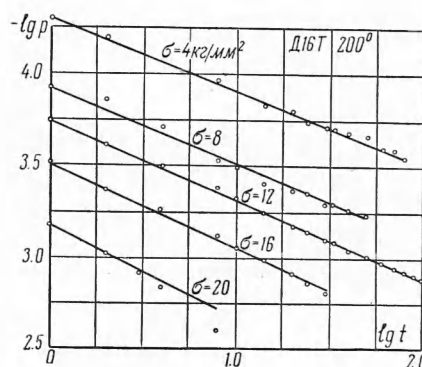
Таблица 1

150°	σ кг/мм ² кол-во образцов	12 2	12.5 1	16 3	17.5 3	20 5	22.5 1	25 5
150°	σ кг/мм ² кол-во образцов	26.5 1	27.5 4	29.2 3	30 3	32 8	34 3	
200°	σ кг/мм ² кол-во образцов	4 8	8 3	12 10	14 3	15 1	16 5	20 2

Результаты всех экспериментов при данном напряжении и данной температуре наносились на отдельный график, и по ним проводилась средняя кривая, которая принималась за истинную кривую ползучести. На фиг. 2 и 3 приведены осредненные кривые ползучести. Через $\varepsilon^p \equiv p$ обозначена деформация ползучести, т. е. разность полной и начальной деформаций.



Фиг. 3



Фиг. 4

Экспериментальные точки на этих и всех последующих фигурах нанесены кружками.

По гипотезе упрочнения примем

$$\dot{p} p^\alpha = f(\sigma) \quad (2.1)$$

где α — постоянная материала при данной температуре, а $f(\sigma)$ — некоторая функция напряжения.

Из (2.1) при постоянных напряжениях и начальном условии $p = 0$ при $t = 0$ получаем

$$p = \left[\frac{f(\sigma)}{m} \right]^m t^m \quad \left(m = \frac{1}{1 + \alpha} \right) \quad (2.2)$$

При постоянном m кривые ползучести должны быть подобны. Величина m определяется по наклону прямых в координатах $\lg p, \lg t$. Из фиг. 4 видно, что экспериментальные точки хорошо ложатся на параллельные прямые, т. е. m постоянно. Аналогичный результат получается и при 150°.

Исключение составляет кривая для напряжения $\sigma = 20$ кг/мм², при котором уже через 2 часа после начала эксперимента первая стадия ползучести сразу переходит в третью, не описываемую (2.2).

Таким образом, можно считать, что подобие кривых ползучести экспериментально подтверждается в широком диапазоне напряжений. Значения m приведены в табл. 2. Функцию $f(\sigma)$ возьмем в виде

$$f(\sigma) = k \exp \frac{\sigma}{A} \quad (2.3)$$

Из (2.2) и (2.3) получаем

$$p = \left(\frac{kt}{m} \right)^m \exp \frac{m\sigma}{A} \quad (2.4)$$

Соотношению (2.4) в координатах $\lg p, \sigma$ для данного момента времени соответствует прямая. Постоянная A определяет угол наклона прямой, а k — расстояние от начала координат. На самом деле, экспериментальные точки при 150° ложатся на ломаную с точкой излома, соответствующую напряжению $\sigma_* = 25.3 \text{ кг/мм}^2$ (фиг. 5). Естественно, что получаются два значения постоянных k и A соответственно для $\sigma \geq \sigma_*$ и $\sigma \leq \sigma_*$.

Фиг. 5

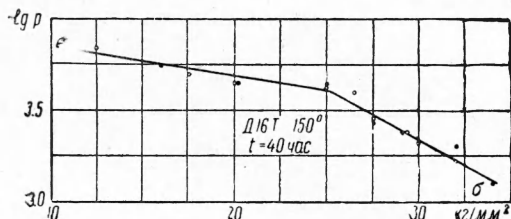


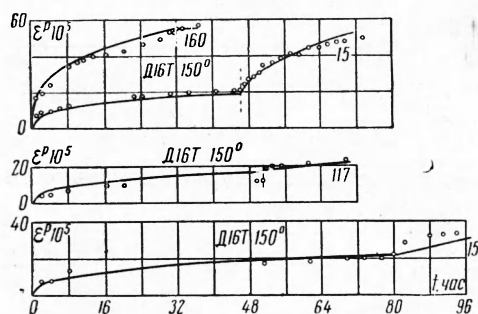
Таблица 2

T	σ	m	k	A	a	n
°C	кг/мм ²	—	час. ⁻¹	кг/мм ²	мм ²ⁿ /час·кг ⁿ	—
150°	≤ 25.3	0.33	$5.68 \cdot 10^{-15}$	8.77	$8.86 \cdot 10^{-17}$	2.18
	≥ 25.3	0.33	$5.60 \cdot 10^{-18}$	2.52	$1.10 \cdot 10^{-29}$	11.4
200°	—	0.42	$1.22 \cdot 10^{-11}$	3.4	—	—

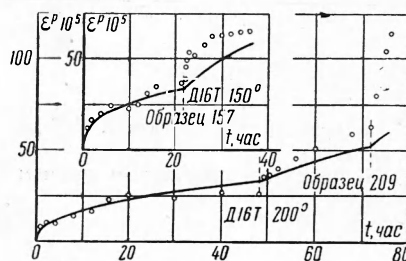
При 200° в исследованном интервале напряжений в координатах $\lg p, \sigma$ получалась прямая.

Заметим, что при 150° , как видно из фиг. 5, результаты испытаний двух партий материала (представленных светлыми и темными кружочками) совпали.

Значения постоянных k, A и m приведены в табл. 2. На фиг. 2 и 3 сплошными линиями изображены кривые ползучести, рассчитанные по (2.4). Нетрудно видеть, что расчетные кривые хорошо согласуются с экспериментальными.



Фиг. 6



Фиг. 7

Такое же хорошее соответствие с экспериментом получается, если вместо экспоненциального взять степенной закон упрочнения

$$\dot{p} p^\alpha = a \sigma^n \quad (2.5)$$

Значения постоянных a и n приведены в табл. 2.

§ 3. Ползучесть при переменных нагрузках. 1. Наиболее важным в теоретическом и практическом отношении является случай переменных нагрузок. Большинство деталей, как правило, работает при переменных нагрузках, в этих условиях выявляется отчетливо различие в теориях ползучести. Эксперименты при переменных нагрузках должны занимать основное место в испытаниях на ползучесть при простом растяжении.

Был проведен ряд опытов на ползучесть при ступенчато изменяющихся нагрузках (табл. 3—5). К образцу после прогрева, соответствующего данной температуре, прикладывалось напряжение σ_1 , при котором он полз в течение времени t_1 . В момент t_1 напряжение изменялось до σ_2 , и образец оставался при нем в течение времени $t_2 - t_1$. В ряде экспериментов изменение напряжения производилось 3—5 раз. В нижних строках табл. 3—5 указаны длины ступенек, а в средних строках — соответствующие напряжения.

Таблица 3

При 150°

№ образца	117		150		151		155		157		160		15	
σ кг/мм ²	13.3	22.2	11.5	32	16	28	32	12	29.16	34	32	17.5	17.5	32
t час	50	18	65	31	80	12	45	47	22	14	31	5	45	27

При 200°

№ образца	215		217		224		255		232		236		252	
σ кг/мм ²	16	14	12	16	16	12	16	14	12	8	12	8	4	8
t час	6	18	48	16	24	48	6	22	8	20	8	20	24	10

Таблица 4

При 150°

№ образца	163					159				
σ кг/мм ²	16	20	25	27.5	30	16	20.15	25.35	27.9	30.6
t час	8	16	13	12	11	8	12	12	13	31

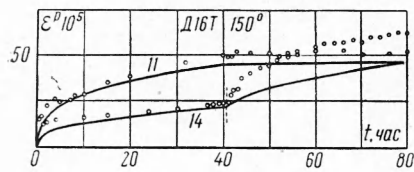
При 200°

№ образца	274			209			251			259			
σ кг/мм ²	4	8	12	16	4	8	12	8	12	0	16	1	8
t час	48	24	18	10	48	24	5	20	9	6	8	10	20

Таблица 5

T°С	При 150°				При 200°			
№ образца	11		14		215		223	
σ кг/мм ²	30	20	20	30	12	16	16	12
t час	40	40	41	39	24	24	24	24
T°С	При 200°							
№ образца	225 (32)		225 (240)		254		242	
σ кг/мм ²	8	16	8	16	8	16	16	8
t час	24	18	24	18	24	12.5	8	20

Деформация ползучести на i -ой ступеньке определится из (2.1) и (2.3)



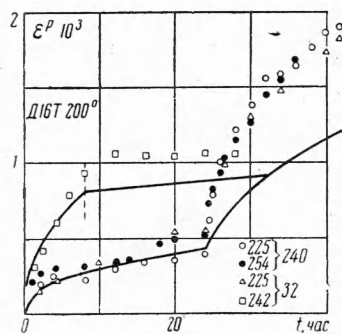
Фиг. 8

$$p = \left[\frac{k_1 t_1}{m} \exp \frac{\sigma_1}{A_1} + \frac{k_1 (t_2 - t_1)}{m} \exp \frac{\sigma_2}{A_1} + \dots \right. \\ \left. \dots + \frac{k_1 (t_j - t_{j-1})}{m} \exp \frac{\sigma_j}{A_1} + \right. \\ \left. + \frac{k_2 (t_{j+1} - t_j)}{m} \exp \frac{\sigma_{j+1}}{A_2} + \dots \right. \\ \left. \dots + \frac{k_2 (t - t_{i-1})}{m} \exp \frac{\sigma_i}{A_2} \right]^m$$

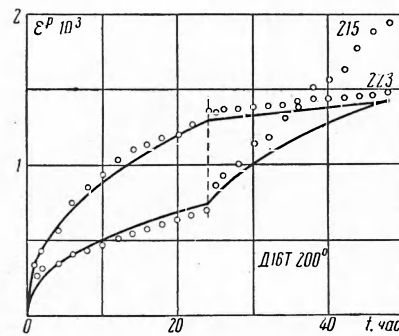
Точка излома лежит между σ_j и σ_{j+1} .

На фиг. 6—10 кривые (3.1) (сплошные линии) сравниваются с экспериментальными данными.

Результаты испытаний приводят к выводу, что если напряжение меняется с большего на меньшее, то экспериментальные точки располагаются вблизи расчетных.



Фиг. 9



Фиг. 10

Если же напряжение меняется с меньшего на большее, то экспериментальные точки располагаются выше теоретической кривой, т. е. теория приближенно соответствует опыту.

Сопоставление результатов опытов с гипотезами старения показывает (фиг. 11), что вторая гипотеза старения

$$f(\dot{p}, \sigma, t) = 0 \text{ (штрих-пунктир)}$$

и особенно первая

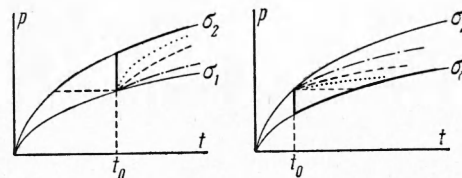
$$f(p, \sigma, t) = 0 \text{ (сплошная линия)}$$

сильно отличаются от эксперимента (точки).

Гипотеза упрочнения изображена здесь штриховой линией.

2. Для гипотезы упрочнения вида

$$\dot{p} = \frac{f(\sigma)}{g(p)}$$



Фиг. 11

Одквистом [2] был доказан так называемый «закон коммутативности нагружения», смысл которого заключается в следующем. Пусть один образец ползет время t_1 при напряжении σ_1 , а затем t_2 при σ_2 . Второй образец, наоборот, ползет сначала в течение времени t_2 при напряжении σ_2 , а затем t_1 при σ_1 . Суммарная деформация ползучести, получаемая к концу испытания в момент $t_1 + t_2$, у обоих образцов одна и та же.

Закон коммутативности должен выполняться также для второй гипотезы старения вида

$$\ddot{p} = \varphi(\sigma) T(t)$$

(доказательство подобно доказательству Одквиста [2]), но не имеет места для первой гипотезы старения.

Нами была предпринята попытка проверки закона коммутативности (табл. 5). Все напряжения, при которых выполнялись эксперименты, находятся ниже предела упругости.

Деформации ползучести, получаемые в конце испытания по различным путям нагружения, отличаются друг от друга (фиг. 8 и 10) (по пути $\sigma_1 < \sigma_2$ накапливается деформация большая, чем по пути $\sigma_1 > \sigma_2$), т. е. можно говорить лишь о приближенном выполнении закона коммутативности нагружения.

3. Одним из случаев ползучести при переменных нагрузках является релаксация напряжений.

Нами было проведено десять экспериментов на релаксацию при 150° и начальных напряжениях σ_0 , равных 20.0, 22.5 (два), 25.0 (два), 26.5, 27.5 (два), 30.0 и 32.0 кг/мм² (все ниже предела упругости).

Деформация удерживалась постоянной с точностью до $\pm 5 \cdot 10^{-6}$. В процессе опыта на релаксацию производилась периодическая автоматическая догрузка, компенсирующая температурные изменения деформации.

Принимая гипотезу упрочнения, в случае релаксации имеем

$$\dot{p}p^\alpha = k \exp \frac{\sigma}{A} \quad (3.2)$$

$$p = \frac{\sigma_0 - \sigma}{E} \quad (3.3)$$

Модуль упругости E в нашем случае равен $6.76 \cdot 10^8$ кг/мм².

Приводимый ниже вывод сделан в предположении, что напряжение не проходит через точку излома σ_* . Интегрируя (3.2) и (3.3) при $\alpha = 1/m - 1 = 2$ (табл. 2), получим кривую релаксации

$$t = \frac{1}{KE^3} \exp \frac{\sigma_0}{A} \left\{ A \exp \frac{\sigma_0 - \sigma}{E} [(\sigma_0 - \sigma)^2 - 2A(\sigma_0 - \sigma) + 2A^2] - 2A^3 \right\} \quad (3.4)$$

Сопоставление кривых (3.3) с результатами испытаний (фиг. 12 и 13) показывает удовлетворительное соответствие теоретических (сплошные линии) и экспериментальных кривых релаксации.

Поступила 10 X 1960

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф и л и п о в Н. В. Реконструирование машин ДСТ-5 для испытания на ползучесть. Заводск. лаборатория, 1956, № 12.
2. О д к в и с т Ф. Технические теории ползучести. Механика. Сб. перев. и обз. ин. период. лит.; 1959, № 2.

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ НЕКОТОРЫХ СМЕШАННЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ПРИ ПОМОЩИ МЕМБРАННОЙ АНАЛОГИИ

А. Я. Александров

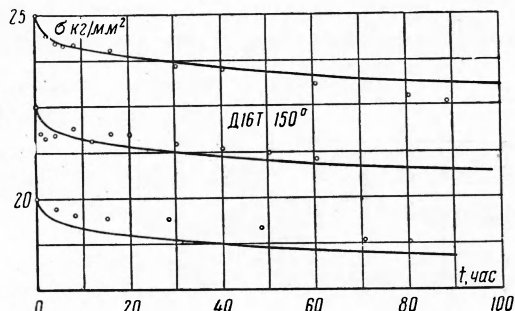
(Новосибирск)

Применение мембранной аналогии для исследования задач, описываемых уравнением

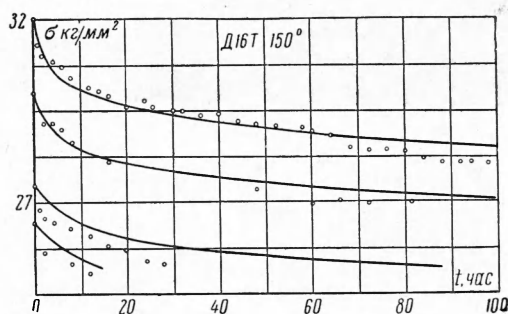
$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = c \quad (1)$$

обычно описывается в случае, когда задано значение $\varphi(x, y)$ на контуре исследуемой области. При $c = 0$ используется ненагруженная мембрана, при $c = \text{const} \neq 0$ — мембрана, нагруженная гидростатической нагрузкой.

Мембранная аналогия могла бы использоваться и для смешанных задач, где на одной части контура заданы значения функции, а на другой — значения ее производ-



Фиг. 12



Фиг. 13