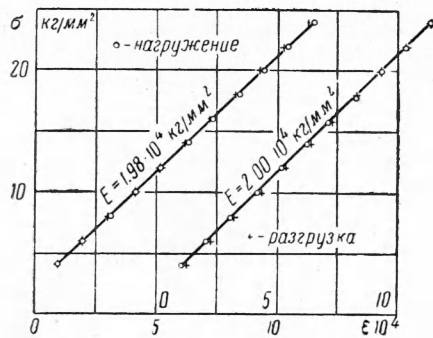


ПОЛЗУЧЕСТЬ ДУРАЛИЮМИНА ПРИ ПОСТОЯННЫХ И ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

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 стержнями¹, изведенная 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.

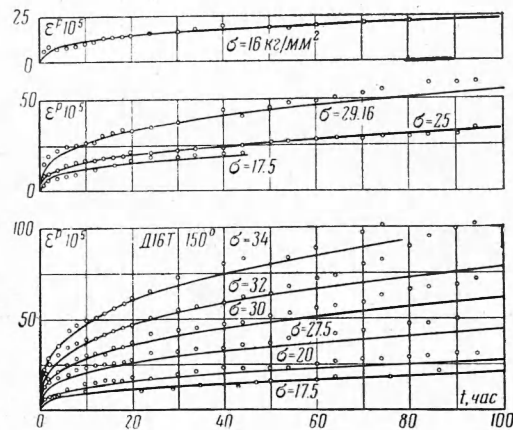
В качестве материала исследования был выбран дуралюмин Д16Т в состоянии поставки, т. е. закаленный и естественно состаренный. Материал поставлен в виде прутков диаметром 25 мм.

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



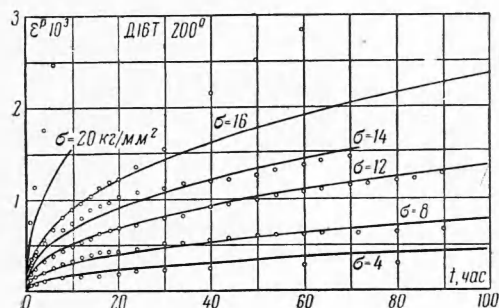
Фиг. 2

§ 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.

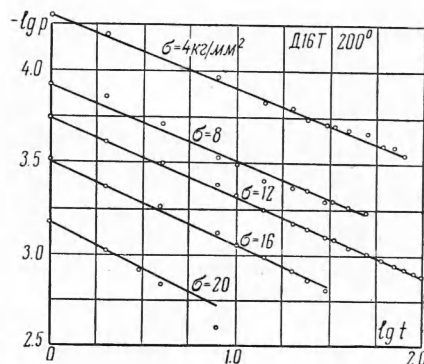
Таблица 1

| | | | | | | | | |
|------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|-----------|---------|
| 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

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

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

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

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).

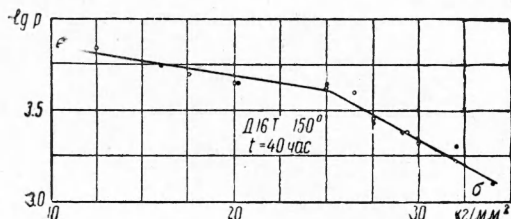
Таким образом, можно считать, что подобие кривых ползучести экспериментально подтверждается в широком диапазоне напряжений. Значения m приведены в табл. 2. Функцию $f(\sigma)$ возьмем в виде

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

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, соответствующей 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

Фиг. 5

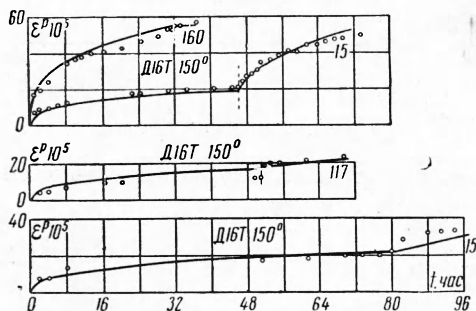
Таблица 2

| 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 | — | — |

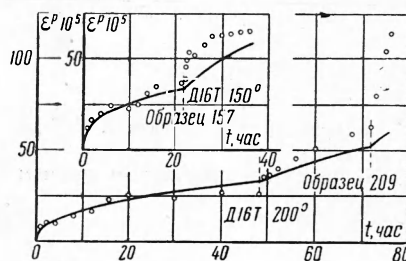
При 200° в исследованном интервале напряжений в координатах $\lg p, \sigma$ получалась прямая.

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 |

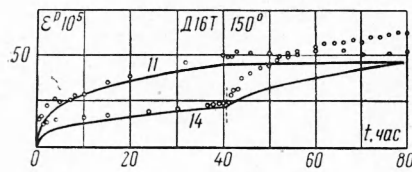
При 200°

| № 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)



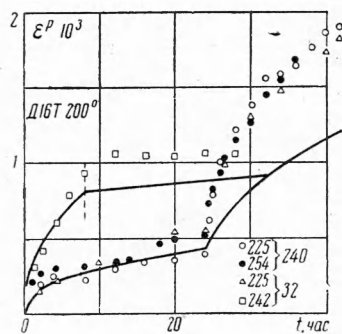
Фиг. 8

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

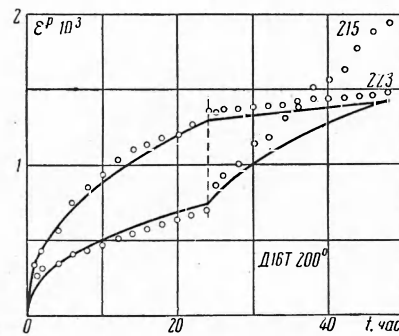
Точка излома лежит между σ_j и σ_{j+1} .

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

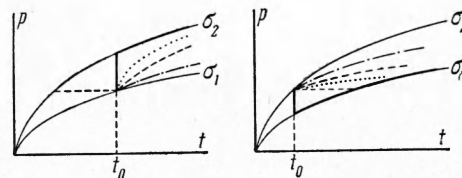
$$f(p, \sigma, t) = 0 \text{ (сплошная линия)}$$

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.

