

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА НЕУСТАНОВИВШУЮСЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ТИПА ВТ-6 ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Ю. П. Каптелин (Ленинград)

Приводятся некоторые результаты экспериментального исследования неустановившейся ползучести при 400° С листового титанового сплава типа ВТ-6 с пониженным содержанием алюминия и ванадия в состоянии постановки и после различной степени кратковременной пластической деформации, т. е. наклепа растяжением.

Установлено, что предварительная кратковременная пластическая деформация порядка 0.5—1.6% не влияет на процесс последующей ползучести и релаксации исследованного сплава во всем диапазоне напряжений, т. е. сравнительно небольшая кратковременная пластическая деформация исследованного сплава повышает такие характеристики прочности, как предел пропорциональности  $\sigma_*$  и условный предел текучести  $\sigma_{0.2}$ , но не изменяет условного предела ползучести. Напротив, значительная кратковременная пластическая деформация (несколько процентов) вызывает разупрочнение и снижает сопротивление материала деформации ползучести.

Сравнение результатов исследования влияния кратковременной пластической деформации на сопротивление ползучести и релаксации, изложенных в работах [1-5], с полученными данными, позволяет сделать вывод, что в одних металлах (например, в меди марки М-1) кратковременный наклеп существенно влияет на последующую ползучесть, но только при относительно высоких напряжениях; в других (например, титановые сплавы) наклеп практически совсем не влияет на последующую ползучесть. Однако, даже если наклеп влияет на последующую ползучесть [4], то упрочнение, вызванное им, оказывается иным по сравнению с упрочнением, вызываемым предшествующей деформацией ползучести. Эти наблюдения подтверждают мнение, что механизм кратковременной пластической деформации и деформации ползучести различны.

### Обозначения и размерности

$\sigma$ — напряжения [кг/мм <sup>2</sup> ],	$t$ — время [час],
$\sigma_+$ — напряжение, до которого производился наклеп (кратковременная пластическая деформация),	$l^0$ — расчетная длина образца [мм],
$\varepsilon^0$ — полная деформация в процессе наклепа, %	$d$ — диаметр образца [мм],
$\varepsilon_+$ — пластическая деформация, полученная при наклепе, %	$\sigma_*$ — предел пропорциональности,
$\sigma_i$ — напряжение, при котором производится испытание на ползучесть ( $i = 1, 2, 3, 4$ ),	$\sigma_{**}$ — предел прочности (временное сопротивление),
$\varepsilon$ — деформация ползучести, %	$\sigma_{0.2}$ — условный предел текучести,
$\sigma_0$ — начальное напряжение релаксации,	$\delta$ — относительное остаточное удлинение при разрыве (%),
	$\psi$ — относительное остаточное сужение при разрыве (%),
	$T$ — температура (°С).

**1. Методика эксперимента.** Испытания на ползучесть в условиях одноосного растяжения производились на установке ИП-2, оборудованной реконструированным экстензометрическим приспособлением [6]. Релаксационные испытания проводились на той же установке с использованием приспособления, описанного в работе [7]. Использовались образцы цилиндрической формы с расчетной длиной 100 мм и диаметром рабочей части 5 мм.

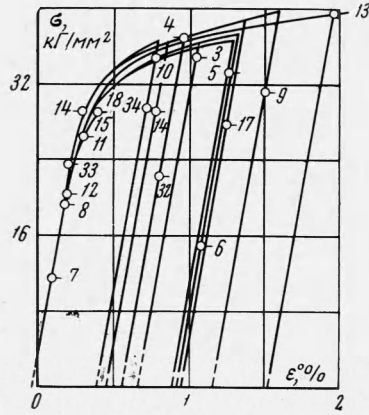
Кратковременный наклеп до заданного значения истинного напряжения с учетом изменения площади поперечного сечения образца в ходе пластической деформации осуществлялся путем ступенчатого нагружения образца на установке ИП-2 при температуре 400° С непосредственно перед началом испытания на ползучесть по методике, описанной в работе [4]. По данным кратковременного растяжения образцов в процессе наклепа и последующей их разгрузки строились диаграммы истинных напряжений в координатах  $\sigma - \varepsilon^0$ .

Температурный градиент по длине образца не превышал величины  $\pm 1^\circ$  С, постоянство температуры на протяжении испытания выдерживалось с точностью  $\pm 2^\circ$  С.

Приводим механические характеристики исследуемого титанового сплава, найденные как среднее из  $n$  ( $n = 5$  и  $n = 3$ ) кратковременных испытаний цилиндрических образцов ( $d = 5$  мм,  $l_0 = 25$  мм).

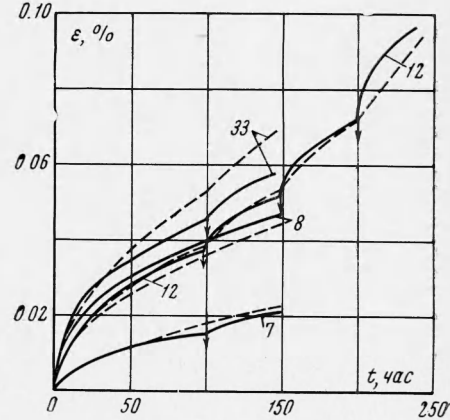
$T$	$\sigma_{**}$	$\sigma_{0.2}$	$\delta$	$\psi$	
20	75.0	66.3	16.4	27.2	( $n = 5$ )
400	44.5	33.0	16.4	56.4	( $n = 3$ )

2. Результаты экспериментов и их обработка. Обработка диаграмм напряжений, полученных при наклепе образцов (фиг. 1), и данных разгрузки после испытаний на ползучесть позволила найти модуль упругости  $E = 0.936 \cdot 10^4$  кг/мм<sup>2</sup> (результат осреднения 32 определений) и предел пропорциональности  $\sigma_* = 23.5$  кг/мм<sup>2</sup> при 400° С.



Фиг. 1

Фиг. 1. Диаграмма напряжений при кратковременном пластическом растяжении образцов перед испытанием их на ползучесть,  $T = 400^\circ \text{C}$ . Точки на диаграмме отмечают напряжения, при которых производилось испытание на ползучесть после кратковременного наклепа. Цифры возле точек на этой и на последующих фигурах соответствуют номерам образцов



Фиг. 2

Фиг. 2. Кривые ползучести исследуемого сплава в ненаклепанном состоянии,  $T = 400^\circ \text{C}$ ,  $\sigma_i \leq \sigma_* = 23.5$  кг/мм<sup>2</sup>, образец 12 —  $\sigma_1 = 20.20$ ,  $\sigma_2 = 23.4$ ,  $\sigma_3 = 26.2$ ,  $\sigma_4 = 29.3$  кг/мм<sup>2</sup>. Стрелки на кривых ползучести на этой и последующих фигурах указывают на изменение напряжения. Стрелка вниз — увеличение, стрелка вверх — уменьшение нагрузки

Испытания на ползучесть делились на две группы. Первая группа испытаний ставилась для изучения влияния наклепа на последующую ползучесть, а вторая — для проверки зависимостей, полученных в результате обработки первой группы испытаний. Ко второй группе относятся испытания на релаксацию и испытания на ползучесть при ступенчатом изменении напряжения.

В первую группу вошли испытания на ползучесть не наклепанных образцов при  $\sigma_i \leq \sigma_* = 23.5$  кг/мм<sup>2</sup> (табл. 1, фиг. 2) и несколько испытаний на ползучесть наклепанных образцов (табл. 2; фиг. 3). Экспериментальные кривые изображены на фигурах сплошными линиями.

Таблица 1

Номер образца	$\sigma_*$	$\sigma_i$	$\sigma_i / \sigma_*$	$\sigma_2$
7	23.5	11.65	0.496	12.82
8		19.35	0.823	—
12		20.20	0.858	23.4
33		23.45	1.00	25.8

Таблица 2

Номер образца	$\sigma_+$	$\epsilon_+$	$\sigma_i$	$\sigma_i / \sigma_+$
13	39.90	1.556	39.90	1.00
4	37.10	0.606	37.10	1.00
10	34.87	0.399	34.87	1.00
14	29.30	0.038	29.30	1.00

Упругая деформация и кратковременная пластическая (имела место при догрузке образца 12 до  $\sigma_4 = 23.3$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\epsilon_+ = 0.013\%$ ) деформации исключались при построении кривых ползучести.

Изобразив результаты испытаний в двойных логарифмических координатах  $\lg t$ ,  $\lg \epsilon$ , убеждаемся, что неустановившаяся ползучесть при постоянной нагрузке вполне удовлетворительно может быть представлена в этих координатах серией параллельных прямых (фиг. 4). Тангенс угла наклона этих прямых  $m = 0.500$ . Если обозначить логарифм деформации ползучести через час после начала опыта  $z$ , то в координатах  $z$ ,  $\sigma$  экспериментальные данные хорошо согласуются с линейным законом распределения. Все это указывает на возможность использовать для аппроксимации уравнение состояния теории упрочнения в форме

$$\dot{\epsilon} \epsilon^\alpha = K \exp \frac{\sigma}{A} \quad \left( \alpha = \frac{1-m}{m} \right) \quad (1)$$

Здесь  $K$ ,  $A$  и  $\alpha$  — постоянные во всем диапазоне исследованных напряжений параметры.

$$\alpha = 1, K = 0.179 \cdot 10^{-10}, A = 5.36 \text{ [кг/мм}^2\text{]} \quad (2)$$

Расчетные кривые ползучести показаны на фиг. 2 и 3 пунктиром.

Результаты этих испытаний показали, что для сплава типа ВТ-6 при температуре  $400^\circ\text{C}$  предварительная кратковременная пластическая деформация порядка 1.5—1.6% практически не влияет на ход последующей ползучести, но ступенчатая ползучесть, т. е. ползучесть после предшествующей деформации ползучести при ином напряжении, вполне удовлетворительно согласуется с гипотезой упрочнения (фиг. 2).

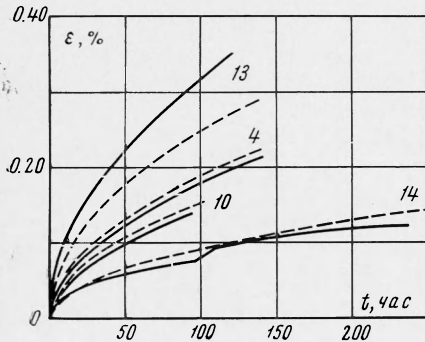


Рис. 3

Фиг. 3. Кривые ползучести наклепанных образцов при  $\sigma_1 = \sigma_+$ ,  $T = 400^\circ\text{C}$

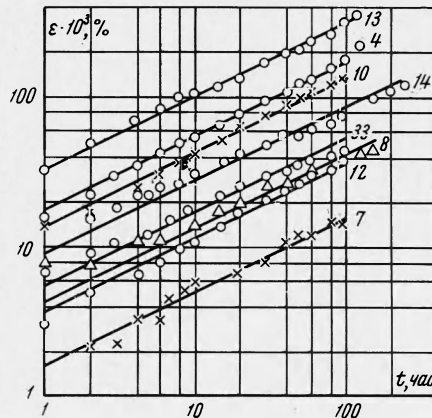


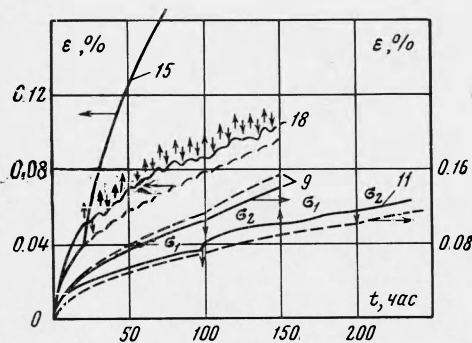
Рис. 4

Фиг. 4. Логарифмические графики ползучести,  $T = 400^\circ\text{C}$

Это подтверждает мнение о том, что механизмы кратковременной деформации и деформации ползучести различны и по-разному влияют на последующую ползучесть [1-4].

В связи с этим, чтобы ответить на вопрос, снимается ли эффект упрочнения от предшествующей ползучести в результате кратковременной пластической деформации, произведенной в некоторый момент времени в ходе испытания на ползучесть, был поставлен следующий эксперимент. Образец 14 после 97 час ползучести при  $\sigma = 29.3$  путем ступенчатых догрузок подвергся наклепу до  $\sigma_+ = 36.7$  и получил в ходе наклепа кратковременную остаточную деформацию  $\epsilon_+ = 0.446\%$ , затем вновь был разгружен до  $\sigma = 29.3$  и испытывался на ползучесть еще 150 час. Как видно на фиг. 3, эта кратковременная пластическая деформация мало отразилась на скорости последующей ползучести. Однако образец 15, который после 20 час испытания на ползучесть при  $\sigma_1 = 29.3$  был подвергнут кратковременному пластическому растяжению на 6.2% ( $\sigma_+ = 41.7$ ), после разгрузки до  $\sigma = 29.22$  начал ползти значительно интенсивнее по сравнению с предшествующим периодом (фиг. 5). По-видимому, кратковременная пластическая деформация в этом случае была столь велика, что вызвала значительное разупрочнение материала (в данном опыте  $\sigma_+$  близко к  $\sigma_{**}$  при  $400^\circ\text{C}$ ).

Для проверки полученных выводов и аппроксимирующих зависимостей была проведена вторая группа экспериментов на ползучесть после наклепа до  $\sigma_+ \approx 37 \text{ кг/мм}^2$



Фиг. 5. Кривые ползучести при ступенчатом изменении напряжения; правая шкала: образец 11 —  $\sigma_1 = 26.35$ ,  $\sigma_2 = 27.70$ ; образец 9 —  $\sigma_1 = 39.95$ ,  $\sigma_2 = 34.67$ ; левая шкала: образец 18 —  $\sigma_1 = \sigma_+ = 29.3$ ,  $\sigma_2 = 23.66$ , 15 —  $\sigma_1 = \sigma_+ = 29.3$ ,  $\sigma_2 = 29.22$ , при  $t = 20$  час наклеп на  $\epsilon_+ = 6.2\%$  при  $\sigma_+ = 41.7 \text{ кг/мм}^2$

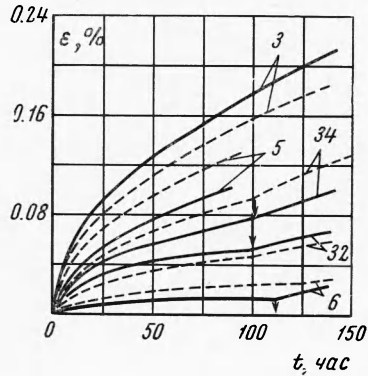
Таблица 3

Номер образца	$\sigma_+$	$\varepsilon_+$	$\sigma_i$	$\sigma_i/\sigma_+$	$\sigma_2$
6	37.6	0.950	15.0	0.399	16.50
32	37.0	0.587	22.2	0.600	24.42
34	37.1	0.415	29.6	0.800	32.56
5	37.1	0.930	33.4	0.901	—
3	36.9	0.702	35.1	0.951	—

при постоянном напряжении и с однократным ступенчатым изменением напряжения (табл. 3, фиг. 6); на ползучесть при циклическом изменении напряжения (фиг. 5). В образце 11 после 100 час ползучести при  $\sigma_1 = 26.35 \text{ кг/мм}^2$  напряжение трижды менялось с интервалами по 50 час от 26.35 до 27.70; образец 18 испытывался на ползучесть первые 20 час при  $\sigma_1 = 29.3 \text{ кг/мм}^2$ , после чего напряжение менялось с периодичностью 5 час от 23.66 до 29.3  $\text{кг/мм}^2$ .

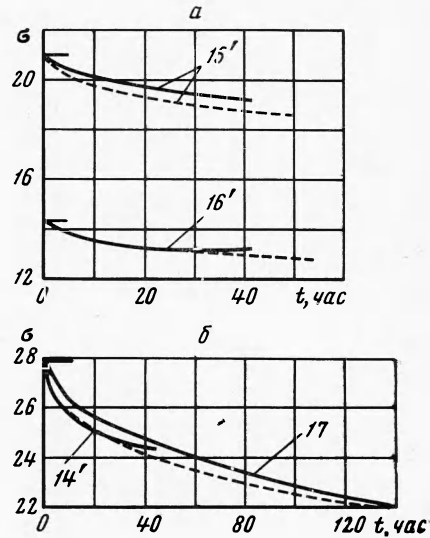
Кроме испытаний на ползучесть были проведены четыре испытания на релаксацию: два образца испытывались в исходном состоянии при начальных напряжениях 20.9, 14.15  $\text{кг/мм}^2$  (фиг. 7, а, образцы 15', 16'); другие два образца испытывались на релаксацию при начальном напряжении  $\sigma_0 = 27.9$ , один из них (фиг. 7, б, образец 17) — после предварительного наклепа кратковременным растяжением до напряжения 39.25 (остаточная кратковременная деформация  $\varepsilon_+ = 0.942\%$ ), а другой — после наклепа до  $\sigma_+ = 27.9 \text{ кг/мм}^2$  (фиг. 7, б, образец 14').

Расчетные кривые, на фиг. 5, 6, 7 построены на основании уравнения состояния (1) с параметрами (2), которые были получены при обработке результатов испытаний на ползучесть ненаклепанных образцов. Хорошее согласование расчетных и экспериментальных кривых во второй группе испытаний подтверждает положение о том, что для исследованного титанового сплава кратковременная пластическая деформация порядка 1% не оказывает влияния на ход ползучести во всем диапазоне напряжений



Фиг. 6

Фиг. 6. Кривые ползучести образцов, наклепанных до  $\sigma_+ = 37 \text{ кг/мм}^2$ ,  $T = 400^\circ \text{C}$ .



Фиг. 7

Фиг. 7. Кривые релаксации: а — в исходном состоянии, б — в наклепанном состоянии

вплоть до  $\sigma_+$ . При этом следует учесть, что все экспериментальные кривые построены по данным испытания в каждом случае только одного образца, а, как известно, испытания на ползучесть и релаксацию образцов-близнецов в одинаковых условиях могут давать существенный разброс опытных данных [4].

Поступила 9 III 1967

## ЛИТЕРАТУРА

1. Даниловская В. И., Иванова Г. М., Работнов Ю. Н. Ползучесть и релаксация хромомolibденовой стали. Изд-во АН СССР, ОН, 1955, № 5.
2. Работнов Ю. Н. О некоторых возможностях описания неустановившейся ползучести с приложением к исследованию ползучести роторов. Изд-во АН СССР, ОН, 1957, № 5.
3. Милейко С. Т., Работнов Ю. Н. Некоторые результаты экспериментального исследования кратковременной ползучести при одноосном растяжении. ПМТФ, 1966, № 5.
4. Каптелин Ю. П. Уравнение состояния для ползучести наклепанной меди. Л. Сб. тр. Ленингр. ин-та инж. ж.-д. трансп., 1962, вып. 192.

5. Каптелин Ю. П. Описание неустановившейся ползучести наклепанной меди. Сб. «Ползучесть и длительная прочность», Новосибирск, СО АН СССР, 1963.
6. Каптелин Ю. П. О точности измерений деформаций на машине ИП-2, предназначенной для испытания на ползучесть. Л., Сб. тр. Ленингр. ин-та инж. ж.-д. трансп., 1960, вып. 174.
7. Каптелин Ю. П. Применение машины ИП-2, предназначенной для испытания на ползучесть, в испытаниях на релаксацию. Л., Сб. тр. Ленингр. ин-та ж.-д. трансп., 1962, вып. 192.

## ОБ УРАВНЕНИИ ПОЛЗУЧЕСТИ МАТЕРИАЛОВ С УПРОЧНЕНИЕМ

А. Ф. Никитенко (Новосибирск)

При описании процессов неустановившейся ползучести материалов по гипотезе деформационного упрочнения широкое распространение получила зависимость вида

$$p^\alpha dp = K_0 e^{\beta_0 \sigma} dt \quad (1)$$

Здесь  $p$  — деформация ползучести,  $\sigma$  — напряжение,  $t$  — время,  $\alpha$ ,  $K_0$ ,  $\beta_0$  — постоянные характеристики материала при фиксированной температуре и заданном интервале напряжений. Однако в работе [1] отмечено, что  $\alpha$  и  $\beta_0$  не остаются постоянными величинами для широкого интервала напряжений. В предлагаемой заметке этот вопрос исследуется более детально на ряде экспериментальных данных, опубликованных в работах [2-5].

Определение характеристик материала обычно проводится следующим образом [2]: интегрируя (1) при  $\sigma = \text{const}$  и полагая  $1/(1 + \alpha) = m$ , получим уравнение

$$p = \frac{K_0}{m} e^{m\beta_0 \sigma} t^m \quad (2)$$

которое в системе координат  $\lg p - \lg t$  представляет семейство прямых с параметром  $\sigma$ . В рассмотренных работах [2-5] эти прямые, исключая [3], были близки к параллельным линиям, что позволяет считать во всем рассматриваемом диапазоне напряжений  $\alpha = \text{const}$ .

Рассматривая значения деформации ползучести, соответствующие разным уровням напряжения при некотором фиксированном значении времени  $t$ , из (2) получим

$$\beta_0 = \frac{\lg p_j - \lg p_i}{0.4343m(\sigma_j - \sigma_i)} \quad (3)$$

откуда определяется среднее значение  $\beta_0$ .

Обработка экспериментальных данных [2-5] показала, что  $\beta_0$  монотонно растет с ростом  $\sigma$ . На фиг. 1 представлены значения  $\beta_0$ , вычисленные из (3) для напряжений  $\sigma = 1/2(\sigma_j + \sigma_i)$ , при этом цифре 1 соответствуют данные работы [4], а цифре 2 — данные работы [5]. Из графиков видно, что  $\beta_0 = \text{const}$  является довольно грубым приближением к действительности. Целесообразно считать  $\beta_0$  некоторой функцией от напряжения, например степенной, заменив уравнение (1) на уравнение вида

$$p^\alpha dp = K e^{\beta_0 \sigma^n} dt \quad (n > 1) \quad (4)$$

а (2) соответственно на уравнение

$$p = \frac{K}{m} e^{m\beta_0 \sigma^n} t^m \quad (5)$$

Логарифмируя (5), получим

$$\lg p = 0.4343m\beta_0 \sigma^n + \lg \left( \frac{K}{m} t^m \right) \quad (6)$$

Если процесс ползучести описывается уравнением (4), то в системе координат  $\lg p - \sigma^n$  экспериментальные точки должны лечь на одну из семейства прямых с параметром  $t$ . Из условия, чтобы три точки, изображающие состояние  $\sigma_1, p_1$ ;  $\sigma_2, p_2$ ;  $\sigma_3, p_3$ ; при некотором фиксированном  $t$ , где  $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ , лежали на одной прямой

$$(\sigma_2^n - \sigma_1^n) \lg p_3 + (\sigma_3^n - \sigma_2^n) \lg p_1 - (\sigma_3^n - \sigma_1^n) \lg p_2 = 0 \quad (7)$$

определяется показатель  $n$ .