

КРАТКОВРЕМЕННАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

С. Т. Милейко, В. И. Теленков

(Новосибирск)

При высокой температуре напряжения вызывают, по крайней мере, три рода деформаций — упругую, пластическую деформацию, не зависящую от времени (при нестационарных режимах нагружения), и пластическую деформацию ползучести, развивающуюся во времени.

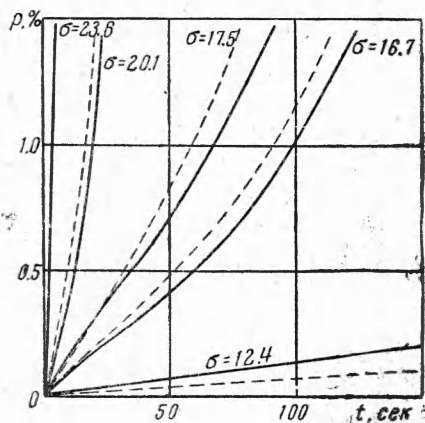
Ряд обстоятельств делают сложной связь между деформациями ползучести и напряжениями, когда последние изменяются во времени в течение десятков и сотен часов. Это, во-первых, влияние упрочнения, выражающееся в зависимости скорости ползучести от накопленной деформации ползучести [1,2]; во-вторых, зависимость скорости ползучести от истории нагружения (простейший пример — значительное возрастание скорости ползучести при увеличении напряжения [2,3] — является, очевидно, особенностью упрочнения); в-третьих, наличие возврата (это обстоятельство требует различать случаи $\sigma > 0$ и $\sigma < 0$).

При расчете полной деформации необходимо сделать некоторые предположения относительно взаимного влияния разного рода деформаций, в первую очередь влияния пластической деформации, не зависящей от времени (назовем ее условно «мгновенной»), и деформации ползучести. Наиболее простой гипотезой будет: деформация ползучести и малая мгновенная пластическая деформация не зависят одна от другой, полная деформация в некоторый момент времени, характеризующийся напряжением σ , равна

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \omega(\sigma') + p; \quad (0.1)$$

Здесь σ/E — упругая деформация; σ' — максимальное напряжение, имевшее место в процессе нагружения; $\omega(\sigma')$ — мгновенная пластическая деформация; p — деформация ползучести, накопленная к данному моменту времени. Приведенная гипотеза выдвинута в работе [4], там же она проверена в опытах на релаксацию в условиях неустановившейся ползучести.

§ 1. Проверить простейшим образом справедливость (0.1) и использовать это в расчете можно в случае ползучести без упрочнения. Такой случай представляется, когда имеет место заметная ползучесть при сравнительно высоких температурах и на-



Фиг. 1. Д16АТ, 275°C, сплошные кривые — эксперимент, пунктир — расчет.

пряжениях в течение весьма малых (для ползучести вообще) времен (секунды, минуты). Оказывается, что в таких условиях для ряда материалов кривая ползучести не имеет участка с уменьшающейся скоростью деформации. При постоянной нагрузке с самого начала устанавливается постоянная скорость деформации, которая начинает возрастать вплоть до разрушения. Типичные кривые кратковременной ползучести приведены на фиг. 1. (Ползучесть при напряжениях и температурах, при которых заметные деформации возникают за десятки секунд, минуты, называется ниже кратковременной ползучестью.)

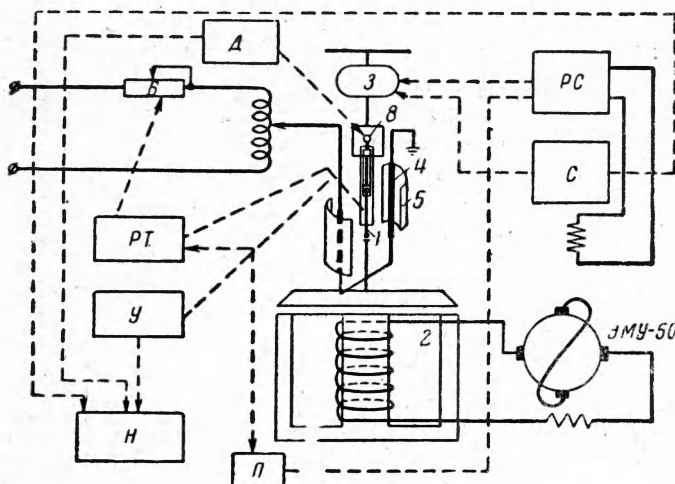
Исследование кратковременной ползучести проводилось на установке, блок-схема которой приведена на фиг. 2.

Нагрузка к образцу 1 прикладывается при помощи электромагнита 2, катушка которого питается электромашиным усилителем ЭМУ-50. Датчиком силы в следящей системе, управляющей нагрузкой, служит динамометр 3 — упругая скоба с наклеенными на нее проволоочными датчиками. Программа задается кулачком, который управляет ползущей линейного потенциометра, включенного параллельно одному из сопротивлений тензометрического моста.

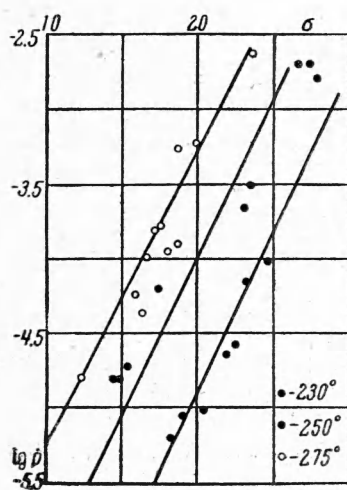
Нагрев образца производится при помощи двух силитовых стержней 4 и круговых цилиндрических отражателей 5. В первичную обмотку трансформатора, питающего нагреватели, включено сопротивление 6 соляного реостата, нож которого приводится двигателем РД-09 на выходе усилителя УЭ-109. Кулачок-задатчик программы по температуре сидит на одном валике с кулачком, задающим силу.

Датчиком температуры образца служит никель-нихромовая термопара 7, каждая из образующих ее проволочек приваривается к образцу конденсаторной сваркой. Диаметр электродов — 0.10 и 0.15 мм. Одна из термопар служит датчиком системы регулирования температуры, сигнал другой термопары подается через усилитель УИПП-2

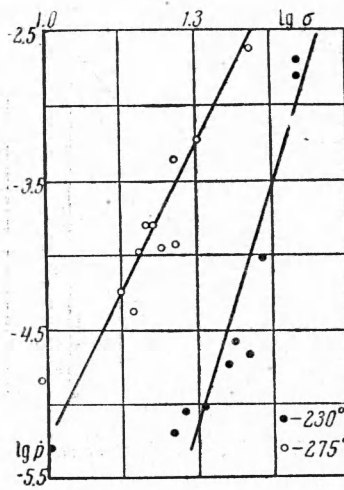
Измерение удлинения производится при помощи экстензометра 8 с упругим элементом, на который наклеены проволочные датчики. Этот же тензометр может служить датчиком системы управления полной деформацией образца.



Фиг. 2. П — блок программы, Н — шлейфный осциллограф Н-700, Д — блок записи деформации, С — блок записи нагрузки, У — усилитель УИПП-2, РТ — блок регулирования температуры, РС — блок регулирования нагрузки



Фиг. 3. Д16АТ, σ кг/мм²



Фиг. 4. Д16АТ, σ кг/мм²

§ 2. Материалом в экспериментах служили листы толщиной 2 мм сплавов Д16АТ и АМГ6М, материал исследовался в состоянии поставки, время выдержки при температуре испытания перед приложением нагрузки 1—2 мин, скорость нагрева до заданной температуры — 200—300°/мин.

Полученные данные для Т16АТ представлены на фиг. 3 в координатах $\lg \dot{p}$ и σ , а также в координатах $\lg \dot{p}$ и $\lg \sigma$ на фиг. 4. Расположение экспериментальных точек

показывает, что зависимость скорости ползучести от напряжения можно выразить в виде

$$\text{либо } \dot{p} = k(T) e^{\alpha \sigma} \quad (2.1)$$

$$\text{либо } \dot{p} = B(T) \sigma^{m(T)} \quad (2.2)$$

Здесь $k(T)$, $B(T)$, $m(T)$ — характеристики материала, зависящие от температуры. Наклон прямых в координатах $\lg \dot{p}$ и σ при температурах 230, 250 и 275° не зависит от температуры, т. е. можно считать, что α не зависит от температуры в диапазоне 230—275°. Это — наиболее интересный диапазон с точки зрения исследования кратковременной ползучести. Построение зависимости $k(T)$ в полулогарифмических координатах

показывает, что ее можно аппроксимировать также экспоненциальной функцией

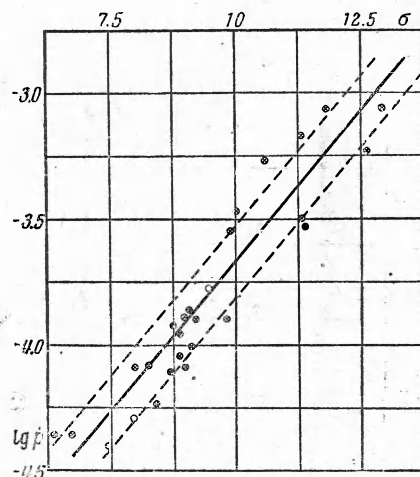
$$k(T) = k_0 e^{\nu T} \quad (2.3)$$

Таким образом, уравнение кратковременной ползучести можно записать в весьма простом виде

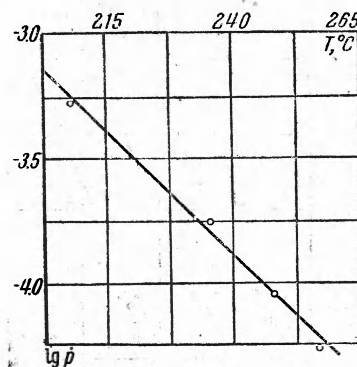
$$\dot{p} = k_0 e^{\alpha \sigma + \nu T} \quad (2.4)$$

Значения констант для Д16АТ-2, полученные после обработки экспериментальных данных, приведены в табл. 1.

Для АМГ6М-2 константы определены по малому числу испытаний в интервале температур $[T_1 = 200^\circ, T_2 = 250^\circ]$ по следующей простой схеме. При температуре $T_0 \approx 0.5(T_1 + T_2)$ снимается серия кривых ползучести ($\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$), определяются $\dot{p}_i$ и наносятся экспериментальные точки в координатах $\lg \dot{p}$ и σ (фиг. 5 — точки, отмеченные крестиками), но полученной прямой находятся α и $k(T_0) = k_0 \exp \nu T$; далее снимаются кривые ползучести при некотором среднем напряжении σ_0 интервала на-



Фиг. 5. АМГ6М, 227°C, σ кг/мм²



Фиг. 6. АМГ6М, $\sigma_0 \approx 9$ кг/мм²

пряжений фиг. 5 и некоторых температурах интервала $[T_1, T_2]$, строится зависимость $\lg \dot{p}$ от T при $\sigma = \sigma_0$ (фиг. 6), определяются ν и $k(\sigma_0) = k_0 \exp \alpha \sigma_0$; затем находится k_0 (табл. 1).

Отметим, что зависимость (2.4) справедлива не только в случае алюминиевых сплавов. Опубликованные в работе [2] в виде таблиц и графиков экспериментальные данные по кратковременной ползучести нержавеющей стали NS20C (химический состав: 0.10% С, 10.5% Cr, 18% Ni, 0.5% Ti) хорошо описываются формулой (2.4), если принять значения констант, приведенные в табл. 1.

Для проверки зависимости (2.1) при $\dot{\epsilon} < 0$ проведен ряд экспериментов с периодическим снятием нагрузки на время, соизмеримое со временем действия нагрузки. Заметного возврата, как и в работе [6], обнаружено не было, скорость ползучести после восстановления нагрузки равна скорости ползучести перед снятием нагрузки.

Серия экспериментов была проведена для непосредственной оценки влияния предварительной мгновенной пластической деформации на скорость последующей ползучести. При температуре испытания образец быстро (≈ 5 кг/мм²сек) нагружался до

напряжений, дающих остаточную деформацию $\omega(\sigma') = 0.3 \div 2\%$ и сразу же быстро разгружался, затем прикладывалось некоторое напряжение σ и определялось $\dot{p}$. Экспериментальные точки нанесены на фиг. 5; точки, отмеченные светлыми кружками, соответствуют $\omega(\sigma') = 1.0 - 2.0\%$; точки, отмеченные темными кружками, соответствуют $\omega(\sigma') = 0.3 \div 0.6\%$. Как видно, полученные точки не выходят за пределы вероятного отклонения от аппроксимирующей зависимости, определенной указанным выше способом. Таким образом, можно принять, что мгновенная пластическая деформация не упрочняет материал в смысле сопротивляемости ползучести. Очевидно, что без специальных экспериментов это нельзя распространить на большие пластические деформации.

§ 3. Рассмотрим теперь кривую растяжения $\varepsilon = \omega_1(\sigma)$, снятую при достаточно большой скорости $\dot{\varepsilon}_1$ нагружения (фиг. 7 — кривая 1). Интегрируем (2.4), имея в виду, что $\sigma = \dot{\varepsilon}_1 t$, $T = T_0$ и $p = 0$ при $t = 0$, получим

$$p(t) = \frac{k(T_0)}{\alpha \dot{\varepsilon}_1} [e^{\alpha \sigma} - 1] \approx \frac{k(T_0)}{\alpha \dot{\varepsilon}_1} e^{\alpha \sigma} = p(\sigma) \quad (3.1)$$

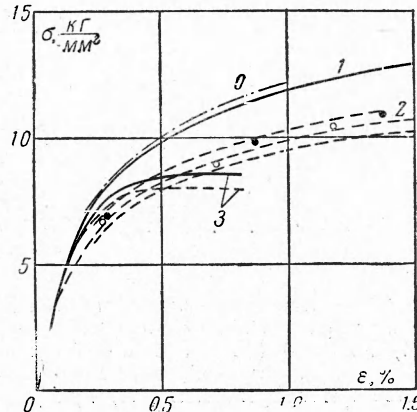
Кривая деформирования без деформаций ползучести (мгновенная кривая) дается выражением

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E} + \omega(\sigma) = \psi_1(\sigma) - \frac{k(T_0)}{\alpha \dot{\varepsilon}_1} e^{\alpha \sigma} = \psi_0(\sigma) \quad (3.2)$$

Кривая $\psi_0(\sigma)$ представлена на фиг. 7 (кривая 0).

При любой истории нагружения полная деформация в данный момент времени получается добавлением к $\sigma/E + \omega(\sigma')$ деформации ползучести, накопленной к этому моменту. Так, если $\sigma = \dot{\varepsilon}_2 t$, то

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \omega(\sigma) + \frac{k(T_0)}{\alpha \dot{\varepsilon}_2} e^{\alpha \sigma} \quad (3.3)$$



Фиг. 7. АМГ6М, 227°C, сплошные кривые — эксперимент, пунктирные — расчет

На фиг. 7 нанесены точки (светлыми и темными кружками), соответствующие двум экспериментальным кривым, снятым при $\dot{\varepsilon} = 0.06 \text{ кг/мм}^2 \text{ сек}$. Штриховыми линиями 2 отмечена полоса, соответствующая среднему квадратичному отклонению точек в опытах при $\sigma = \text{const}$ (фиг. 5), причем разброс экспериментальных точек на фиг. 6, а также разброс мгновенных кривых приняты пренебрежимо малыми по сравнению с рассеянием скоростей ползучести при $\sigma = \text{const}$.

Аналогичные кривые растяжения с различными скоростями нагружения получены для сплава Д16АТ-2 при $T = 230 - 275^\circ$ и сплава АМГ6М-2 при $T = 200 - 250^\circ$; совпадение их с расчетными кривыми также достаточно хорошее.

Если $\sigma(t)$ имеет произвольный вид, то $p(t)$ может быть легко получена численным интегрированием (2.4).

Рассмотрим также два эксперимента, в которых задается полная деформация образца, — релаксацию напряжений и растяжение с постоянной скоростью полной деформации. Условие релаксации как всегда

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \omega(\sigma') + p = \text{const} \quad (3.4)$$

Уравнение кривой релаксации получается из (2.1) с учетом (3.4), имеем:

$$\frac{\dot{\sigma}}{E} + \dot{p} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + k(T_0) e^{\alpha \sigma} = 0, \quad \sigma(t) = -\frac{1}{\alpha} \ln [e^{-\alpha \sigma_0} + \alpha k E t] \quad (3.5)$$

Здесь σ_0 — напряжение при $t = 0$. При достаточно больших t имеем $\alpha k E t \gg \exp(-\alpha \sigma_0)$ и при этом

$$\sigma(t) \approx -\frac{1}{\alpha} \ln \alpha k E t \quad (3.6)$$

Уравнения (3.5) и (3.6) справедливы, конечно, лишь в том диапазоне напряжений, в котором определены константы в (2.4). Если, например, этот диапазон ограничен снизу напряжением σ_1 , то

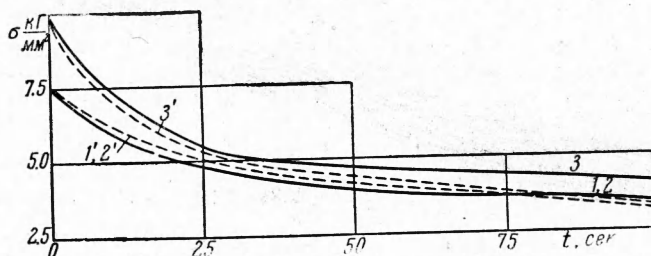
$$\sigma(t) = -\frac{1}{\alpha} \ln (\alpha k E t) < \sigma_1$$

Для АМГ6М-2 при 227°C и $\sigma_1 \approx 4 \text{ кг/мм}^2 \text{ сек}$ имеем

$$t < \frac{\exp(-\alpha \sigma_1)}{\alpha k E} \approx 60 \text{ сек}$$

В рассматриваемом случае результаты эксперимента на релаксацию позволяют сделать следующие два вывода:

1°. Если получить кривую релаксации при некотором начальном напряжении σ_0 и затем снова нагрузить образец до того же напряжения σ_0 и снова проследить процесс релаксации, то по совпадению этих двух кривых можно убедиться в отсутствии упрочнения. (Ранее этот вывод сделан из линейной зависимости деформации ползучести от времени при $\sigma = \text{const.}$) Кривая 1, 2 на фиг. 8 соответствует совпадающим кривым первой и второй релаксации на одном и том же образце.



Фиг. 8. АМГ6М, 227°C, сплошные кривые — эксперимент, пунктирные — расчет

2°. Соответствие экспериментальных кривых релаксации (1, 2 и 3 на фиг. 8) кривым, рассчитанным по формуле (3.5), подтверждает справедливость уравнения (2.4) при $\dot{\epsilon} < 0$ (1', 2' и 3' на фиг. 8).

Уравнение кривой растяжения с постоянной скоростью полной деформации получается интегрированием (2.1) при условии

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon} t = \dot{\epsilon}_0 + p \quad (3.7)$$

а также аппроксимацией мгновенной кривой двумя отрезками прямой с модулем упругости E , модулем упрочнения E' и ординатой σ_T угловой точки. При $\sigma \leq \sigma_T$ это уравнение имеет вид

$$\sigma = E\epsilon - \frac{1}{\alpha} \ln \left[1 + \frac{k(T_0)}{\dot{\epsilon}} (\exp(E\alpha\epsilon) - 1) \right] \quad (3.8)$$

и при $\sigma > \sigma_T$

$$\sigma = \sigma_T \frac{E'}{E_T} + E'\epsilon - \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \beta \frac{E'}{E} + \frac{k(T_0)}{\dot{\epsilon}} \exp \left(\alpha \sigma_T \frac{E'}{E_T} \right) \left[\exp(\alpha E' \epsilon) - \beta \frac{E'}{E} \exp \left(\alpha \sigma_T \frac{E'}{E} \right) \right] \right\} \quad (3.9)$$

Здесь

$$\beta = \frac{1 - k(T_0)/\dot{\epsilon}}{1 - [k(T_0)/\dot{\epsilon}] \exp(\alpha \sigma_T)}, \quad E_T = \frac{EE'}{E - E'}$$

Соответствующие экспериментальные и расчетные кривые нанесены на фиг. 7 (кривые 3).

Заметим, что использовать эксперимент при $\dot{\epsilon} = \text{const}$ для определения характеристик материала, что делается довольно часто (обычно на машинах с винтовым приводом), не всегда оправдано по следующим причинам.

1) Этот эксперимент не позволяет просто выделить из полной деформации деформацию ползучести, чтобы ввести ее в уравнение ползучести.

2) Опыт не может быть произведен достаточно точно без применения специальной следящей системы, учитывающей, кстати, кроме прочего, тепловые деформации образца.

3) В реальной конструкции обычно имеют дело не с заданными деформациями, а с усилиями, действующими на конструкцию, поэтому и с этой точки зрения естественно исследовать поведение материалов, задавая напряжения, а не деформации.

§ 4. Процесс ползучести приводит (рано или поздно) к разрушению. Имеется известное решение Хоффа [1], дающее время до разрушения ползущего образца, разрушающегося при больших удлинениях. Ю. Н. Работновым [2] решена аналогичная задача для чисто хрупкого разрушения, когда исчерпание несущей способности определяется распространением хрупкой трещины по сечению образца. В работе [3] принято, что скорость роста трещины является степенной функцией напряжения, действующего в сечении. Как первая, так и вторая схемы дают линейное суммирование повреждений для времени до разрушения при переменных напряжениях.

Д16АТ разрушается при кратковременной ползучести при сравнительно небольших удлинениях, которыми, однако, пренебречь нельзя. Расчет же по схеме ХOFFA приводит к существенному завышению значений времени до разрушения. Примечательно то обстоятельство, что остаточные удлинения практически не зависят от времени до разрушения. Это дает основание предположить, что в рассматриваемом случае можно принять площадь трещины зависящей от величины деформации ползучести.

Предположим, что истинное напряжение в сечении F , вызванное действующей на образец силой Q , равно

$$\sigma = \frac{Q}{F} = \frac{Q}{F_0 [\exp(-p) - \psi(p)]} = \frac{\sigma_0}{\exp(-p) - \psi(p)} \quad (4.1)$$

Здесь σ_0 — условное напряжение, p — натуральная деформация ползучести, $F_0 \exp(-p)$ — площадь поперечного сечения с учетом деформации ползучести, $F_0 \psi(p)$ — площадь трещины, F_0 — начальное сечение образца ($\mu = 0.5$).

Разрушение наступает, когда $p = p_*$ и

$$\exp(-p_*) - \psi(p_*) = 0 \quad (4.2)$$

Подставляя (4.1) в уравнение ползучести (2.2), получим (при постоянной температуре)

$$\dot{p} = B \left(\frac{\sigma_0}{e^{-p} - \psi(p)} \right)^m \quad (4.3)$$

Отсюда время до разрушения

$$\tau = \frac{1}{B \sigma_0^m} \int_0^{p_*} [e^{-p} - \psi(p)]^m dp, \quad \text{или} \quad \tau = \frac{S(p_*)}{B} \sigma_0^{-m} \quad (4.4)$$

Таким образом, получено обычное уравнение кривой длительной прочности

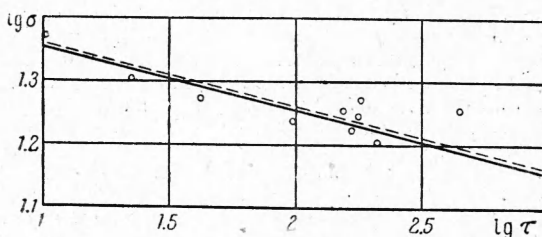
$$\tau = \kappa \sigma_0^{-m} \quad (4.5)$$

В первом приближении можно положить

$$\psi(p) = \kappa p \quad (\kappa = \text{const}) \quad (4.6)$$

Если считать также $e^{-p} \approx 1 - p$ (величина p достаточно мала), то соотношение (4.2) дает

$$p_* = \frac{1}{1 + \kappa} \quad (4.7)$$



Фиг. 9. Д16АТ, 275°C

т. е. κ определяется деформацией при разрыве. Время до разрушения

$$\tau = \beta \sigma_0^{-m} \quad (\beta = 1/B (1 + \kappa)(1 + m)) \quad (4.8)$$

Таким образом, κ — единственная константа, которую нужно определить из экспериментов на разрушение. Определить ее, воспользовавшись зависимостью (4.7), нельзя, так как величина p весьма условна из-за большой неравномерности деформации по длине образца и наличия шейки. Поэтому приходится делать это косвенным путем.

Определяется время до разрушения при некотором, лучше сравнительно высоком, напряжении σ_0 ; откладываются экспериментальные точки (очевидно, нужна серия экспериментов из-за значительного разброса) в координатах $\lg \tau$ и $\lg \sigma_0$ (на фиг. 9 точки, соответствующие $\tau = 150-200$ сек); проводится прямая с угловым коэффициентом наклона m , так чтобы среднеквадратичное отклонение указанных экспериментальных точек от этой прямой было наименьшим (штриховая прямая на фиг. 9); по положению этой прямой определяется множитель β в уравнении (4.8), а следовательно, и константа κ . Сплошной линией проведена на фиг. 9 прямая с учетом всех нанесенных экспериментальных точек. Как видно, она лишь незначительно отличается от прямой, построенной описанным выше способом.

Для Д16АТ-2 введенные константы имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} \text{для } T = 275^\circ \text{C, } m = 10.0, B = 0.525 \cdot 10^{-16}, \kappa = 4.00 \\ \text{для } T = 230^\circ \text{C, } m = 16.5, B = 0.200 \cdot 10^{-26}, \kappa = 3.53 \end{aligned}$$

Приведенная схема позволяет построить всю кривую кратковременной ползучести от момента приложения нагрузки до разрушения. Действительно, интегрируя (4.3), записанное в виде

$$\dot{p} = B \left[\frac{\sigma_0}{1 - (1 + \kappa)p} \right]^m \quad (4.9)$$

если $p = 0$ при $t = 0$; получим уравнение кривой ползучести с участком ускоренной ползучести

$$p = \frac{1}{1+\kappa} \left\{ 1 - [1 - B(1+\kappa)(1+m)\sigma_0^m t]^{\frac{1}{1+m}} \right\} \quad (4.10)$$

При $T = 275^\circ\text{C}$ результаты расчета показаны на фиг. 1 (штриховыми линиями). Нетрудно видеть, что принятая гипотеза приводит к линейному суммированию повреждаемостей. Действительно, интегрируя (4.3) при произвольном σ_0 , получим

Таблица 2

T, °C	$\frac{\sigma}{\text{мм}^2/\text{сек}}$	σ_{0b}	
		эксп.	расч.
230	0.35	27.6	29.0
230	0.02	23.8	24.6
275	1.40	26.8	26.9
275	0.40	24.4	22.8
275	0.10	20.6	21.3
275	0.025	18.1	18.7

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\chi \sigma_0^{1+m}} = 1 \quad (4.11)$$

что соответствует линейному суммированию повреждаемостей. Определим условное разрушающее напряжение δ_{0b} для случая, когда $\sigma_0 = \sigma_0 t$ и $\sigma_{0b} = \sigma_0 \tau$. Используя (4.11), будем иметь

$$\sigma_{0b} = [\chi(m+1)\sigma_0]^{\frac{1}{1+m}} \quad (4.12)$$

Для Д16АТ-2 сравнение результатов экспериментов с расчетом приводится в табл. 2.

Выводы 1. В условиях кратковременной ползучести полная деформация складывается из упругой, мгновенной пластической деформации и деформации ползучести. Мгновенная пластическая деформация не упрочняет материал в смысле сопротивляемости ползучести.

2. Кратковременная ползучесть может быть описана весьма простыми зависимостями. Это позволяет весьма просто и надежно восстанавливать мгновенные кривые, а также определять расчетом кривые деформирования при любой истории нагружения в условиях кратковременной службы материала.

3. Время до разрушения в условиях кратковременной ползучести определяется по характеристикам ползучести, если сделать некоторые допущения о характере роста трещины. Для расчета долговечности при переменных нагрузках в этих условиях можно пользоваться гипотезой линейного суммирования повреждаемостей.

4. Расчет интенсивно нагруженных кратковременно работающих конструкций предлагается основывать на знании поведения материалов в реальных условиях. Диаграммы растяжения, снятые при достаточно большой температуре на обычных разрывных машинах с низкими (часто нефиксированными) скоростями деформации (иногда нагружения), не дают полной картины поведения материалов в условиях эксплуатации. Нельзя также ограничиваться получением только данных по кратковременной ползучести при $\sigma = \text{const}$, как это делается в ряде работ [7].

Авторы благодарят Ю. Н. Работнова, руководившего работой, а также М. В. Митрофанову и В. Е. Мырина, обеспечивших эксперимент.

Поступила 29 V 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Работнов Ю. Н. О некоторых возможностях описания неустойчившейся ползучести с приложением к исследованию ползучести роторов. Изв. АН СССР, ОН, 1957, No. 5.
2. Наместников В. С., Хвостунков А. А. Ползучесть дуралюмина при постоянных и переменных нагрузках. ПМТФ, 1960, No. 4.
3. Nishihara T., Taira S., Tanaka K., Ohji K., Influence of stress — Change on the Primary Creep of Low Carbon Steel. Proc. of the 6th Japan Nat. Cong. Appl. Mech., 1955.
4. Даниловская В. И., Иванова Г. М., Работнов Ю. Н. Ползучесть и релаксация хромомолибденовой стали. Изв. АН СССР, ОН, 1955, No. 5.
5. Faure G., Tonski A. Determination de la vitesse de fluage etabli d'un acier refractaire fluant très rapidement a haute temperature. La recherche aeronautique 1961, No. 85.
6. Poulignier J. Fluage periodique rapide. Cas du nicrale D alliage refractaire Fe — Ni — Cr. La recherche aeronautique, 1961, No. 83.
7. Hoff N. J. The necking and the Rupture of Rods Subjected to Constant Tensile Loads. Journ. of Appl. Mech., 1953, vol. 20, No. 1.
8. Работнов Ю. Н. О механизме длительного разрушения. Сб. Вопросы прочности материалов и конструкций, М., Изд-во АН СССР, 1959.
9. Poulignier J. Fluage rapide de l'alliage refractaire Fe — Ni — Cr, nicrale D. La recherche aeronautique, 1961, No. 81.