

## О ПОЛЗУЧЕСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

*B. C. Наместников*

*(Новосибирск)*

Ниже приводятся результаты большой программы экспериментального исследования алюминиевого сплава при одностороннем растяжении, направленного на изучение поведения металла в условиях ползучести при переменных нагрузках и закономерностей, которым оно подчиняется.

1. Эксперименты проводились на четырехсекционной установке (4СМП) для испытаний на ползучесть, спроектированной и изготовленной в Институте гидродинамики СО АН СССР. Каждая секция представляет собой машину рычажного типа с нижним расположением рычага. Осевое усилие создается весом воды в нагружочном баке, висящем на конце рычага, которая поступает через сменные диафрагмы из бака постоянного уровня. Следовательно, нагрузка прикладывается плавно с постоянной скоростью. Диапазон изменения скорости нагружения 0.02—1000 кг / мин. Постоянная скорость разгрузки осуществлялась поплавковым устройством. Осевое усилие измерялось динамометром, встроенным в силовую цепочку, погрешность которого не более  $\pm 1\%$ .

Деформация удлинения измерялась микронным индикатором по относительному смещению тяг, жестко укрепленных на венчиках, ограничивающих рабочую часть образца. Отсчеты деформаций и осевого усилия по динамометру производились визуально. При больших же скоростях нагружения индикаторы, измеряющие удлинение и усилие, фотографировались одновременно с секундомером фотоаппаратом через каждые две-три секунды.

Нагрев осуществлялся электрической печью сопротивления с двухсекционной обмоткой. Дилатометрический регулятор поддерживал температуру в течение эксперимента в пределах  $\pm 1.5^\circ$ , перепад же температуры вдоль образца не превышал  $2^\circ$ . Температура контролировалась на каждом образце тремя хромель-копелевыми термопарами при помощи потенциометра типа ПП-1 и записывалась электронным самопишущим потенциометром. Холодные спаи термопар помещались в сосуд Дюара с маслом, температура которого измерялась термометром.

Образец плоский, с расчетной частью длиной 100 и шириной 10 мм. Образцы изготавливались на фрезерном станке с последующей слесарной доводкой в шаблонах.

В качестве исследуемого материала был выбран алюминиевый сплав Д16АТ, поставленный в виде листа толщиной 1.85 мм. Все образцы вырезались вдоль проката из одной партии материала.

Температура испытаний  $150^\circ$ . Перед приложением нагрузки образец выдерживался при температуре испытания в течение суток. Другой термической обработки не производилось.

Исследование проводилось при малых деформациях, не превышающих 2%.

2. Как известно [1], диаграмма растяжения металла при комнатной температуре в общем случае зависит от скорости деформирования; однако при малых (статических) скоростях деформирования это влияние незначительно и им можно пренебречь. Следовательно, можно говорить о существовании единой диаграммы растяжения или, как говорят, «статической диаграммы».

При высокой температуре картина осложняется наличием ползучести. Тем не менее, и в этом случае, по-видимому, можно ставить вопрос о мгновенной статической диаграмме растяжения, понимая под этим диаграмму, получаемую при такой скорости нагружения, когда явлением ползучести можно пренебречь. Полагаем, что и здесь должен существовать интервал скоростей нагружения, отличающихся на порядки, в котором кривые растяжения почти неотличимы одна от другой. Несомненно, что скорости нагружения, при которых явлением ползучести можно пренебречь, зависят от материала и температуры.

Нам представляется, что в многочисленных работах по ползучести мгновенные деформации понимаются в указанном смысле.

3. В теории ползучести с работ Дейвенпорта [2] и Надаи [3] полная деформация  $\epsilon$  представлялась в виде суммы упругой  $\sigma / E$  и пластической  $e$  составляющих

$$\epsilon = \sigma / E + e \quad (1)$$

Позднее Ю. Н. Работновым это соотношение было уточнено [4]

$$\epsilon = p + \varphi(\sigma) \quad (2)$$

где  $p$  — деформация ползучести, а  $\varphi(\sigma)$  — мгновенная деформация, представляющая собой мгновенную диаграмму растяжения. Кроме предположения о существовании

мгновенной диаграммы, здесь полагается, что мгновенная пластическая деформация и деформация ползучести независимы. Поводом к этому послужил опыт [5], заключавшийся в том, что у двух образцов создавались одинаковые по величине пластические деформации; в одном — в результате ползучести, а в другом — мгновенно. Затем оба образца испытывались на релаксацию при одном и том же начальном напряжении. Кривые релаксации оказались разные, причем у второго образца кривая релаксации мало отличалась от кривой, полученной на недеформированном образце.

Позднее зависимость (2) изучалась в работе [6] в условиях кратковременной ползучести. Авторы проводили опыты на ползучесть на предварительно мгновенно пластически деформированных образцах и на недеформированных.

Результаты, представленные в полулогарифмических координатах  $\sigma - \lg p$ , легли в широкую полосу разброса, откуда делается вывод о независимости мгновенных пластических деформаций и деформаций ползучести.

Представляет интерес рассмотреть обратное влияние деформации ползучести на мгновенную пластическую деформацию.

4. Ниже сделана попытка получить кривую мгновенного растяжения, а также изучить влияние деформации ползучести на эту кривую. Для этого проводились эксперименты по следующей программе. Образец нагружался с постоянной достаточно большой скоростью  $\dot{\sigma}$  до некоторого уровня напряжения  $\sigma$  (первая ступень нагрузки), затем полз при этом напряжении ( $\dot{\sigma} = 0$ ) в течение некоторого времени, при этом накапливалась деформация ползучести  $\Delta p$  (вторая ступень). Далее производилось додорожение до некоторого  $\sigma$  или разгрузка с постоянной большой скоростью изменения напряжения  $\dot{\sigma}$  (третья ступень). Последующие ступени нагрузки являются комбинациями предыдущих; на некоторых образцах количество ступеней нагрузления равнялось шести. Примеры программ испытаний приведены в табл. 1, где напряжения  $\sigma$  даны в  $\text{кг}/\text{мм}^2$ , а скорости изменения напряжений  $\dot{\sigma}$  — в  $\text{кг}/\text{мм}^2\text{мин}$ . По этим программам было испытано около 25 образцов.

Таблица 1

№ образцов	Ступени нагрузки											
	первая		вторая		третья		четвертая		пятая			
	$\sigma^*$	$\sigma$	$\sigma^*$	$\Delta p \cdot 10^3$	$\sigma^*$	$\sigma$	$\sigma^*$	$\Delta p \cdot 10^3$	$\sigma$	$\sigma^*$	$\sigma$	
589-3	95.7	30	0	5.60	50.6	43.5	-48.8	—	1	105	43.2	
603-2	50.0	25	0	1.40	36.0	34.0	0	1.837	34.0	-96.8	1	
580-1	53.1	30	0	3.50	45.1	36.5	—	—	—	—	—	
602-1	25.4	25	0	1.15	-80.0	1	59.0	—	36.4	—	—	
588-2	79.4	30	0	3.65	94.9	41.2	-100	—	1	—	—	
20-1	6.50	32.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Типичные результаты представлены на фиг. 1.

Кривая  $b$  является результатом приведения к одному началу трех кривых растяжения, полученных со скоростями нагружения, отличающимися на два порядка (0.85, 6.94 и 70  $\text{кг}/\text{мм}^2\text{мин}$ ). Как видно, все экспериментальные точки довольно хорошо располагаются вдоль одной кривой.

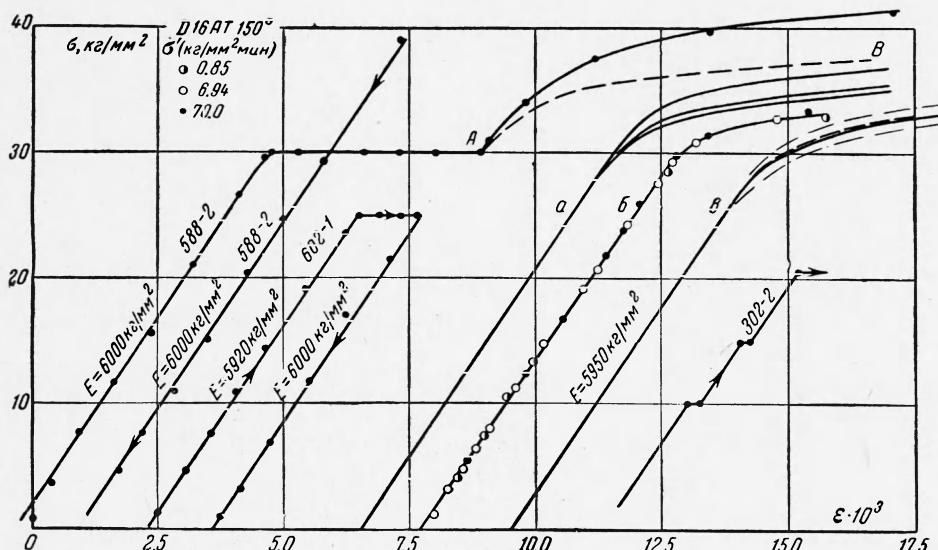
Кривая  $a$  является результатом приведения к одному началу двух кривых, одна из которых (сплошная) получена осреднением всех кривых растяжения, полученных со скоростями, превышающими 6.5  $\text{кг}/\text{мм}^2\text{мин}$ , а вторая (штриховая) — кривых, полученных при скоростях нагружения около 1  $\text{кг}/\text{мм}^2\text{мин}$ . Обе кривые практически совпали. Штрих-пунктирные кривые ограничивают полосу, в которую легли все имеющиеся кривые.

Резюмируя сказанное, можем утверждать, что при  $\dot{\sigma} > 1 \text{ кг}/\text{мм}^2\text{мин}$  для данного материала и температуры влиянием ползучести можно пренебречь и кривую  $b$  принять за кривую мгновенного растяжения.

5. Рассмотрим теперь влияние деформаций ползучести на мгновенные деформации. Начнем с разгрузок. Известно, что при нормальной температуре разгрузка от любого напряжения происходит по прямой, параллельной прямой упругого нагружения. Повторное нагружение следует по той же прямой разгрузки вплоть до напряжения, с которого производилась разгрузка.

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что при высокой температуре разгрузка с большой скоростью после ползучести при напряжениях, как превышающих, так и не превышающих предел пропорциональности, следует по прямой, параллельной прямому участку кривой мгновенного растяжения  $b$  (например, 588-2, 602-1 на фиг. 1). Повторное нагружение следует той же прямой вплоть до напряжения, с которого производилось разгрузение (на фигуре не показано).

Таким образом, деформация ползучести не влияет на мгновенную разгрузку, следующую за ползучестью до некоторой величины, а также на повторное нагружение до напряжения, с которого произведена разгрузка. Разгрузка и повторная нагрузка следуют упругому закону.

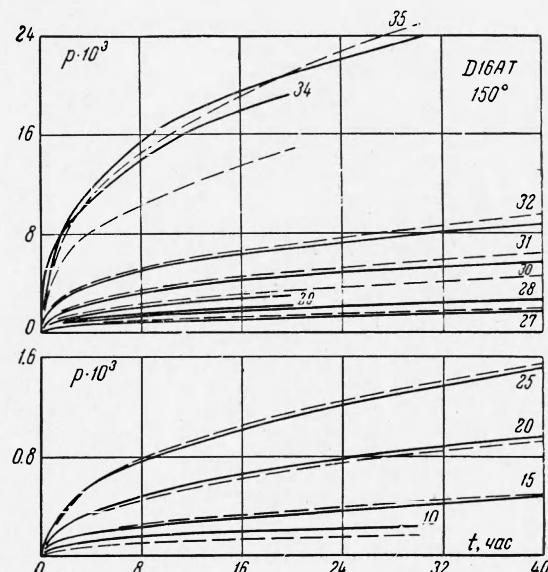


Фиг. 1

Теперь рассмотрим догрузки. Мгновенная догрузка после ползучести при напряжении ниже предела пропорциональности  $\sigma_*$  следует по крайней мере до напряжения  $\sigma_*$  упругому закону (например, образец 302-2 на фиг. 1) с тем же модулем упругости, что у кривой мгновенного деформирования. Следовательно, ползучесть в этом случае не влияет на мгновенные упругие деформации.

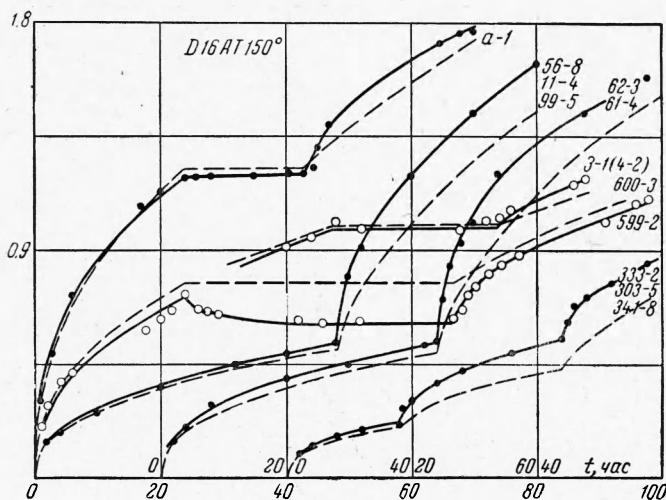
Как известно, сплав Д16АТ стареющий, поэтому, чтобы изучить влияние деформаций ползучести на мгновенные пластические деформации, необходимо выделить влияние старения. С этой целью были сняты с большой скоростью нагружения диаграммы растяжения на образцах, выдержаных при температуре испытания в течение различных промежутков времени. На фиг. 1 кривые *a* представляют три кривые растяжения, приведенные к одному началу, полученные после выдержки соответственно 24, 48 и 72 час (снизу вверх). Как видно, процесс старения оказывает при данной температуре заметное влияние на диаграмму растяжения. Однако на упругие деформации как при активном нагружении, так и при разгрузке (последнее на фигуре не приведено) старение не оказывает никакого влияния.

Если мгновенная догрузка производится после ползучести при некотором напряжении  $\sigma_0$  и деформация ползучести не влияет на мгновенную пластическую деформацию, то кривая догрузки должна воспроизводить часть кривой мгновенного растяжения образца, выдержанного при данной температуре соответствующее количество



Фиг. 2

часов, лежащей выше напряжения  $\sigma_0$ . На фиг. 1 штриховая кривая  $AB$  у образца 588-2 является участком кривой мгновенного растяжения, который должен был бы совпасть с кривой мгновенной дегрузки. В действительности же кривые мгновенной дегрузки располагаются, как правило, выше этих штриховых кривых. Эта разница растет с величиной накопленной деформации ползучести.



Фиг. 3

Таким образом, мгновенная пластическая деформация зависит от деформации ползучести. Деформация ползучести оказывает упрочняющее действие на мгновенные пластические деформации.

Заметим, что некоторый упрочняющий эффект мгновенной пластической деформации на последующую ползучесть обнаруживается в работе [5], а в работе [7] он еще больше. Но этот эффект, по-видимому, менее сильный, чем обратный эффект влияния деформаций ползучести на мгновенные пластические деформации. Кажется, этого следовало ожидать, так как мгновенная пластическая деформация происходит путем сдвига вдоль локализованных плоскостей скольжения, а при ползучести деформирование идет равномерно по всему телу зерна. Если ползучесть следует за мгновенным пластическим деформированием, то влияние его невелико, так как плоскости скольжения, по которым прошли сдвиги, составляют небольшую часть плоскостей, по которым происходят сдвиги при последующей ползучести. При обратном порядке нагружения плоскости, по которым идут сдвиги, обуславливающие мгновенную пластическую деформацию, оказываются уже упрочненными предварительной ползучестью.

6. Большое число экспериментов было выполнено при постоянных нагрузках.

Приводим величины напряжений  $\sigma$  (в  $\text{kg}/\text{мм}^2$ ), при которых были выполнены эти опыты, и количество образцов, испытанных при каждом напряжении (последнее указано в скобках), 10(9), 15(15), 20(16), 25(23), 27(2), 28(3), 29(4), 30(8), 31(6), 32(5), 34(7), 35(6). Осредненные по всем опытам кривые ползучести приведены на фиг. 2 (сплошные линии), на которых цифры обозначают величины напряжения в  $\text{kg}/\text{мм}^2$ . Здесь  $p$  — деформация ползучести, равная разности полной и мгновенной деформаций.

Поведение при постоянных нагрузках сплава Д16АТ аналогично поведению Д16Т [8]. Кривые ползучести при различных напряжениях  $\sigma$  оказались подобными, а опытные точки при фиксированном времени  $t_0$  в координатах  $\log \sigma$ ,  $\log p$ , как и в работе [8], легли на ломаную линию, точка перелома которой соответствует пределу пропорциональности ( $\sigma_* = 27.5 \text{ kg}/\text{мм}^2$ ) мгновенной кривой растяжения. Следовательно, гипотеза упрочнения

$$f(p, p, \sigma) = 0 \quad (3)$$

может быть принята в виде

$$p^{\alpha} = k\sigma^n \quad (4)$$

Полученные величины постоянных равны:

$$\alpha = 1.439, \quad m = 0.41$$

$$n = 5.14, \quad k = 8.02 \cdot 10^{-17} \quad \text{при } \sigma \leq 27.5$$

$$n = 29.07, \quad k = 2.23 \cdot 10^{-51} \quad \text{при } \sigma \geq 27.5 \text{ kg}/\text{мм}^2$$

Размерность величины  $k = \text{мм}^2 \text{час}^{-1} \text{кг}^{-n}$ .

Кривые ползучести, рассчитанные по соотношению (4) и этим константам, изображены на фиг. 2 штриховыми линиями и хорошо соответствуют опытным.

7. Характерные данные о проведенных экспериментах на ползучесть при ступенчато изменяющейся нагрузке приведены в табл. 2, где  $\varepsilon$  и  $\Delta\varepsilon$  — соответственно мгновенная деформация и ее приращение на каждой ступени нагружения, а  $\theta$  — продолжительность ступени в час. По этой программе опытов было испытано более 60 образцов.

Таблица 2

№ образцов	Ступени нагрузки								
	первая			вторая			третья		
	$\sigma$	$\varepsilon \cdot 10^3$	$\theta$	$\sigma$	$\Delta\varepsilon \cdot 10^3$	$\theta$	$\sigma$	$\Delta\varepsilon \cdot 10^3$	$\theta$
56-8	15	2.38	48	25	1.64	32	—	—	—
62-3	15	2.30	44	25	1.66	34	—	—	—
303-5	10	1.50	18	15	0.83	26	20	0.88	14
592-3	31	5.29	45	35	1.34	9	—	—	—
520-2	32	6.04	50.5	34	0.41	19.5	—	—	—
488-3	30	4.87	24	34	1.17	20	—	—	—
a-1	25	3.73	24	15	-1.545	19	25	1.55	26
3-1	20	3.30	48	10	-4.21	26	20	1.26	14
591-2	34	9.61	24	20	-2.48	24	34	2.52	8
596-3	34	11.87	45	15	-3.42	24	34	3.48	3
600-3	20	2.94	24	1	-3.05	42,5	20	3.06	31.5

На фиг. 3 и 4 (где по оси ординат даны значения  $10^3 p$ ) кружками изображены типичные (как правило, осредненные по нескольким испытаниям) кривые ползучести, полученные в опытах при указанных условиях.

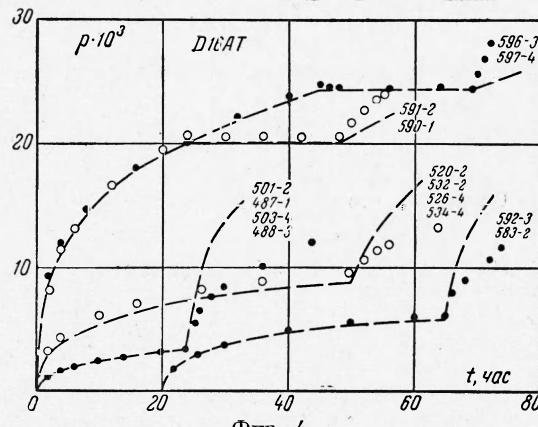
Штриховые кривые на этих фигурах соответствуют гипотезе упрочнения; расчет этих кривых производился графическим, широко известным способом по исходным кривым ползучести, и, следовательно, не зависит от конкретной аппроксимации зависимости (3).

Остановимся сначала на случае возрастающей нагрузки. Анализ полученных результатов показывает, что при напряжениях ниже предела пропорциональности теория упрочнения при ступенчатых нагрузках дает заниженные результаты (фиг. 3 и 4, кривые, осредненные по образцам №№ 333-2, 303-5 и 341-8; 62-3 и 61-4; 56-8, 11-4, 99-5). При напряжениях выше предела пропорциональности или при переходе через предел пропорциональности теория упрочнения, наоборот, дает повышенные результаты (592-3 и 583-2; 520-2, 532-2, 526-4 и 534-4; 501-2, 487-1, 503-4 и 488-3).

Последнее обстоятельство, по-видимому, связано с тем, что деформации ползучести, накопленные на предыдущей ступени, а также старение влияют на мгновенную кривую растяжения, как бы упрочняют материал, а у упроченного материала следует ожидать и более высокого сопротивления ползучести. Теория же в сформулированном виде исходит из независимости мгновенных пластических деформаций и деформаций ползучести и не учитывает старение.

Рассмотрим теперь случаи, в которых часть или вся нагрузка сбрасывается на некоторый промежуток времени, а затем восстанавливается на прежнем уровне.

На участках, где сбрасывается не более, по крайней мере, половины нагрузки, теория упрочнения хорошо соответствует опыту (фиг. 3 и 4, кривые, осредненные по образцам №№ 591-2 и 590-1, 596-3 и 597-4; a-1, 3-1). Там же, где сбрасывается



Фиг. 4

значительная часть нагрузки (фиг. 3, 600-3 и 599-2), наблюдается возврат и соответствие с теорией нарушается.

На участках, где нагрузка восстановлена, опытные кривые обнаруживают большие скорости ползучести, чем это следует по теории, и, следовательно, располагаются выше теоретических. Расхождение с теорией тем больше, чем большая часть нагрузки была сброшена на предыдущем участке, однако там, где имелся возврат, создается впечатление, что деформация возврата быстро восстанавливается и экспериментальная кривая приближается к теоретической (600-3 и 599-2 на фиг. 3).

Таблица 3

№ образцов	$\sigma_0$ кг/мм <sup>2</sup>	Ступени нагрузки									
		первая		вторая		третья		четвертая		пятая	
		$\sigma^*$	$\sigma$	$\sigma^*$	$\sigma$	$\sigma^*$	$\sigma$	$\sigma^*$	$\sigma$	$\sigma^*$	$\sigma$
95-1	1	0.00208	10	0.00268	28	—	—	—	—	—	—
311-1	10.0	0.00256	—	—	—	—	—	—	—	—	—
451-3	28.3	-1.419	15.1	0	8 ч.	-1.421	2.74	—	—	—	—
450-4	28.9	-0.43	21.5	0	1.6 ч.	-0.51	18.45	-0.33	14.6	0	8.8 ч.
452-4	25.3	-0.461	18.5	-0.332	10.5	0	3.4 ч.	-0.611	6	-0.39	3.7
447-1	26.5	-0.25	24.7	-0.127	21.81	-0.086	21.63	-0.135	21	0	11.2 ч.
77-4	1	0.0139	32.6	—	—	—	—	—	—	—	—

8. В ряде опытов программа испытания заключалась в следующем: образец быстро нагружался ( $\sigma \sim 70 \text{ кг} / \text{мм}^2$ ми) до некоторого напряжения  $\sigma_0$ , а затем полз при уменьшающемся с постоянной скоростью напряжении до некоторого его значения  $\sigma$  (первая ступень), при котором скорость менялась скачком, а затем полз при напряжении, убывающем с этой новой скоростью до некоторого нового значения  $\sigma$  (вторая ступень), и т. д. (табл. 3). На некоторых ступенях  $\sigma^* = 0$ , т. е. напряжение не менялось, в этих случаях в графике  $\sigma$  указаны продолжительности этих ступеней в час.

Пусть в некоторый момент времени

$$t = t_0, \quad \sigma = \sigma_0, \quad p = p_0 \quad (5)$$

$$\sigma = \sigma_0 \pm \sigma^* (t - t_0) \quad \text{при } t \geq t_0 \quad (6)$$

Интегрируя (4) при условиях (5) и (6), получим

$$p = \left\{ p_0^{1/m} + \frac{k\sigma_0^{n+1}}{m(n+1)\sigma^*} \left[ \mp 1 \pm \left( 1 \pm \frac{\sigma^*}{\sigma_0} [t - t_0] \right)^{n+1} \right]^m \right\}^m \quad (7)$$

Очевидно, что

$$\Delta\sigma = \sigma^* (t - t_0) \quad (8)$$

В нашем случае  $\Delta\sigma / \sigma_0 \ll 1$  (так сделать легко), следовательно, из (7) получим с высокой точностью

$$p = \left\{ p_0^{1/m} + \frac{k\sigma_0^n}{m} (t - t_0) \right\}^m \quad (9)$$

что представляет собой формулу для расчета кривой ползучести при ступенчатом изменении нагрузки, а значит можно пользоваться графическим построением кривых ползучести, применяемым обычно в этих случаях. Величина  $t - t_0$  для (9) вычисляется по (8). Следующий шаг выполняется очевидным образом. Данный способ сильно упрощает счет по сравнению с вычислением (7) и вместе с тем достаточно точен.

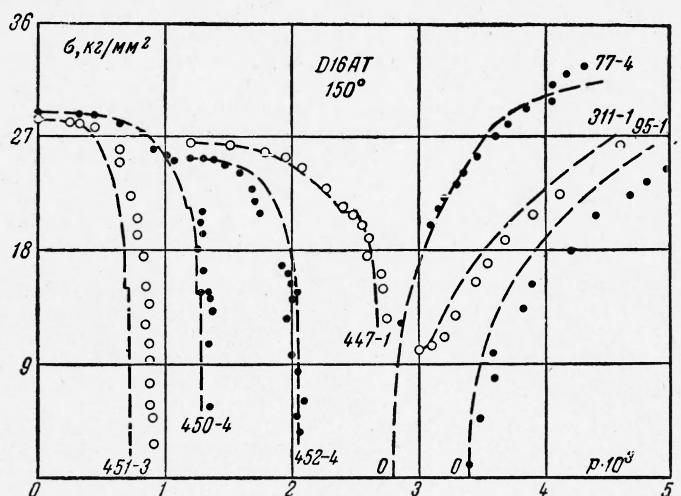
Типичные кривые, подсчитанные по (7), при отрицательной скорости нагружения изображены на фиг. 5 штриховыми линиями. Очевидно, что в этом случае, даже если разгрузка ведется из пластической области кривой мгновенного растяжения, теория упрочнения хорошо соответствует эксперименту.

9. Некоторое количество испытаний было выполнено по той же программе, что и в предыдущем случае, с той лишь разницей, что скорости изменения напряжения были положительными (табл. 3).

В табл. 3 приведены данные только некоторых образцов (общее количество их более 40), испытанных по двум последним программам.

На фиг. 5 представлены типичные экспериментальные кривые деформации ползучести  $p$ , причем по-прежнему, деформация ползучести получалась из полной вычитанием мгновенной деформации по имеющейся кривой мгновенного растяжения. Штриховые кривые подсчитаны по гипотезе упрочнения (7).

Рассмотрим сначала участки кривых ниже предела пропорциональности. Очевидно, что при малых скоростях нагружения теория дает заниженные по сравнению с опытом деформации ползучести, т. е. тот же результат, что и при ступенчатом увеличении нагрузки. С увеличением скорости нагружения эта разница менее заметна.



Фиг. 5

На участках, где напряжение выше предела пропорциональности, теоретические кривые, как и следовало ожидать, пересекают опытные. В некоторых случаях экспериментальные точки указывают на уменьшение деформации ползучести. Все это связано с тем, что деформации ползучести и мгновенные пластические деформации взаимосвязаны. Накопленные деформации ползучести изменяют мгновенную кривую растяжения; однако в работе использовалась исходная кривая, так как характер ее зависимости от деформации ползучести не известен.

В проведении экспериментов и обработке результатов принимала участие Н. С. Бильесова.

Поступила 16 X 1963

#### ЛИТЕРАТУРА

- Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. ИЛ, 1954.
- Davendroff. Correlation of creep and relaxation properties of copper. J. Appl. Mech., 1938, vol. 5, № 2.
- Nadai A. The influence of time upon creep. S. Timoshenko Anniversary Volume, N. Y., 1938.
- Rabotnov Yu. N. Pelzanie metali i obliczanie pelzania. Rozprawy inżynierskie, CLVIII, 1960, m. VIII, z. 3.
- Даниловская В. И., Иванова Г. М., Работнов Ю. Н. Ползучесть и релаксация хромомолибденовой стали. Изв. АН СССР, ОТН, 1955, № 5.
- Милюко С. Т., Теленков В. И. Кратковременная ползучесть алюминиевых сплавов. ПМТФ, 1962, № 5.
- Работнов Ю. Н. О некоторых возможностях описания неустановившейся ползучести с приложением к исследованию ползучести роторов. Изв. АН СССР, ОТН, 1957, № 5.
- Наместников В. С., Хвостунков А. А. Ползучесть дуралюмина при постоянных и переменных нагрузках. ПМТФ, 1960, № 4.