

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ  
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМУ ДЕФОРМИРОВАНИЮ  
НЕКОТОРЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКОНАХ НАГРУЖЕНИЯ

А. Ф. МЕЛЬШАНОВ

(Москва)

Приводятся результаты экспериментального исследования поведения титановых сплавов BT1-0, OT-4 и мягкой стали (Ст. 3) при различных режимах одноосного нагружения.

Предложены определяющие уравнения, связывающие напряжение, пластическую деформацию и скорость пластической деформации.

Из обработки экспериментальных данных при постоянной скорости нагружения найдены значения параметров этих уравнений. Показана возможность предсказания на основе сформулированной теории результатов экспериментов при нестационарных режимах.

1. Деформирование технических сплавов в пластической области сопровождается более или менее заметными временными эффектами, которые проявляются в виде скоростной зависимости диаграммы растяжения, ползучести при постоянной нагрузке, релаксации при постоянной деформации. При нормальной температуре эти эффекты сравнительно невелики, они обнаруживаются тогда, когда эксперименты проводятся при скоростях деформации, разнящихся на несколько порядков.

Для описания ползучести металлов при высоких температурах широко применяется так называемая гипотеза упрочнения, согласно которой определяющее уравнение материала связывает при данной температуре величины напряжения  $\sigma$ , пластической деформации  $p$  и скорости пластической деформации  $\dot{p}$

$$F(\sigma, p, \dot{p}) = 0, p = e - \sigma/E \quad (1.1)$$

где  $e$  — полная деформация,  $E$  — модуль упругости.

Уравнение типа (1.1) не объясняет всех явлений, наблюдаемых при испытаниях на ползучесть при переменных нагрузках, однако при надлежащем выборе функции  $F$  позволяет описать результаты опытов с достаточной для практики степенью точности [1].

Уравнение (1.1) определяет скорость пластической деформации  $\dot{p}$  через мгновенные значения  $\sigma$  и  $p$ ; таким образом оно не принимает во внимание истории нагружения. Альтернативная точка зрения состоит в построении определяющих уравнений наследственного типа в форме Вольтерра — Фреге или в одном из более простых вариантов.

Для описания поведения металлов и сплавов при нормальных температурах в работе [2] был предложен вариант теории наследственного типа

$$\Phi(p) = \sigma + \int_{-\infty}^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau \quad (1.2)$$

При проведении описанной ниже программы испытаний на двух титановых сплавах и Ст. 3 было обнаружено, что наследственные эффекты для этих материалов незначительны, поэтому для описания поведения их была сделана попытка применить уравнение типа (1.1), т. е., по существу, использовать ту же гипотезу упрочнения, которая оправдала себя для областей высоких температур.

В теории ползучести при высоких температурах обычно уравнение (1.1) представляется в виде

$$\dot{p} = \varphi(p) f(\sigma)$$

В области нормальных температур оказалось более удачным следующее представление определяющего уравнения:

$$\sigma = \sigma_0 + f_1(p) + f_2(p) \quad (1.3)$$

Если принять  $f_2(0) = 0$ , то уравнение  $\sigma = \sigma_0 + f_1(p)$  будет представлять собою уравнение диаграммы пластического деформирования с бесконечно малой скоростью, которую можно назвать статической диаграммой. Существование такой диаграммы часто постулируется (известная схема Мальверна — Соколовского), однако данные по испытанию с чрезвычайно малыми скоростями отсутствуют и нет оснований для того, чтобы приписывать статической диаграмме реальный физический смысл. Поэтому на уравнение (1.3) будем смотреть как на аппроксимацию общего соотношения (1.1), справедливую в том диапазоне изменения параметров, который был охвачен экспериментальной программой.

При обработке опытных данных естественно выбрать для функции  $f_1$  и  $f_2$  некоторые аналитические выражения. Программа испытаний была построена следующим образом. Для каждого материала проводились опыты с постоянной скоростью растяжения или сжатия, по результатам этих испытаний находились параметры функций  $f_1$  и  $f_2$ , а также  $\sigma_0$ . После этого были поставлены опыты на растяжение со ступенчатым изменением скорости, испытания на ползучесть и испытания на релаксацию. По ранее найденным параметрам при помощи уравнения (1.3) были рассчитаны теоретические кривые и произведено сравнение результатов расчета с экспериментом.

Один из испытанных материалов — Ст. 3 обладает зубом текучести. В последнее время появилась тенденция описывать зуб текучести при помощи уравнения типа (1.1) [3]. Здесь сохраним схему, изложенную в [4] и связывающую зуб с эффектом задержки текучести в соответствии с условием

$$\int_0^{\tau} \varphi(\sigma) dt = 1 \quad (1.4)$$

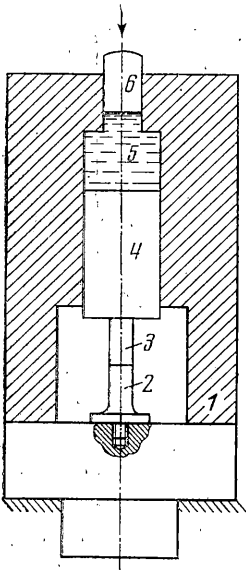
При заданной скорости деформации в упругой области напряжение будет линейной функцией времени, и из уравнения (1.4) находится верхний предел текучести и момент его достижения; дальнейший ход процесса пластической деформации определяется условиями эксперимента.

2. Испытания проводились на образцах из титановых сплавов ВТ1-0, ОТ-4 и Ст. 3 при температуре 20° С в условиях одноосного напряженного состояния. Образцы из ВТ1-0, которые испытывались на растяжение, были цилиндрической формы с рабочей частью длиной 12 мм и диаметром 7 мм.

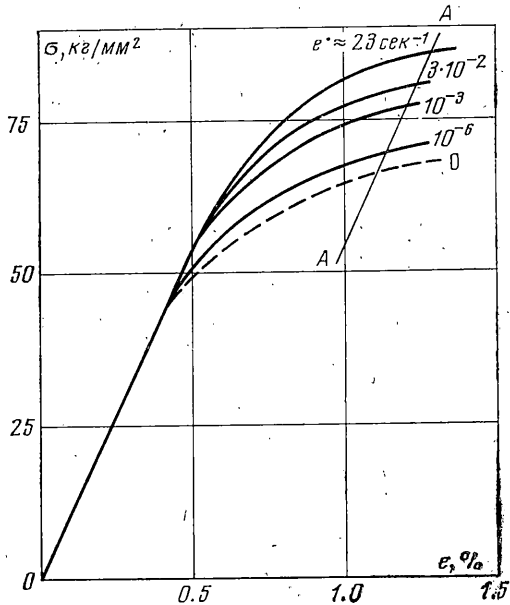
Образцы из ОТ-4, которые также испытывались на растяжение, были плоские, вырезанные из листа в направлении прокатки; длина рабочей части 30 мм, ширина 6 мм и толщина 2 мм. Образцы из Ст. 3, испытанные на сжатие, были цилиндрические диаметром 8 мм и высотой 20 мм, с выточками на торцах, заливаемыми стерином. Полностью трение на торцах при испытании Ст. 3 устранить не удалось.

После испытаний при наблюдении через инструментальный микроскоп обнаруживалась небольшая бочкообразность. Деформацию образцов при испытаниях измеряли при помощи наклеенных электротензометров сопротивления, а при медленных скоростях нагружения — при помощи экстензометров «Инстрон».

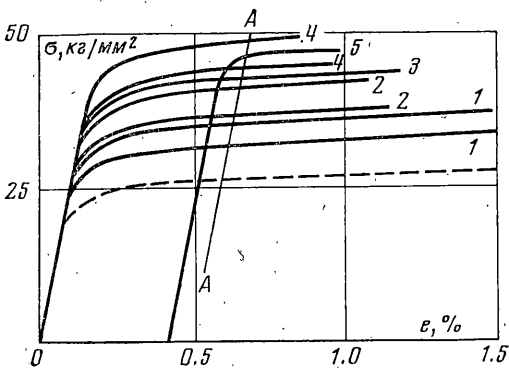
Испытания при медленных скоростях деформирования проводились на машине «Инстрон» модель 1115, позволяющей нагружать образец по заданной программе. К регистрирующему устройству машины был дополнительно подключен двухкоординатный самописец, что позволило регистрировать зависимости  $\sigma \sim t$ ,  $e \sim t$  и  $\sigma \sim e$ .



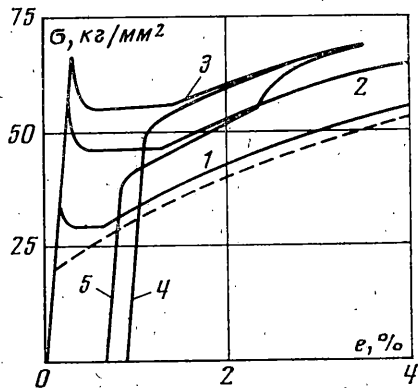
Фиг. 1



Фиг. 3



Фиг. 2



Фиг. 4

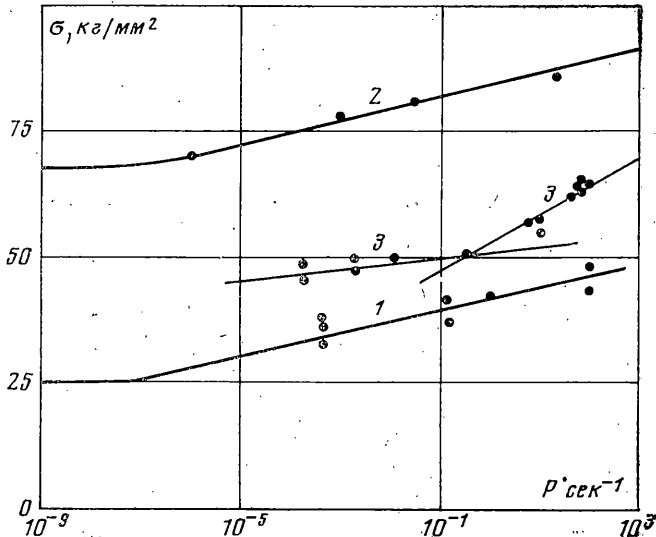
Для испытаний при более высоких скоростях деформирования использовалась испытательная машина с пневматическим приводом, подобная описанной в [6], вертикальный копер [6] и осциллографическая регистрирующая аппаратура [7].

Испытания образцов из Ст. 3 на сжатие проводились на перечисленных выше машинах, но в специальном нагружающем устройстве с гидравлическим редуктором, схема которого приведена на фиг. 1, где 1 — корпус, 2 — динамометр, 3 — образец, 4 — пуансон большого сечения, 5 — камера, заполненная маслом, 6 — пуансон малого сечения.

Эта система осуществляла редукцию перемещений в отношении  $1/10$ . Редуктор использовался только при испытаниях на вертикальном копере для уменьшения ско-

рости, а также для изменения скорости деформирования в процессе опыта, т. е. для догрузки с увеличенной скоростью. В этом случае предварительно подбирался зазор между пуансонами *б* и *4* такой величины, чтобы пуансон *б* догонял пуансон *4* в нужный момент эксперимента, после чего деформирование образца шло уже со скоростью падающего груза.

Испытания материалов проводились при различных законах нагружения: постоянная скорость деформации, постоянная скорость перемещения захватов испытательной машины, постоянная скорость нагружения и разгрузки, кратковременная релаксация и ползучесть, повторное нагружение с вариацией скоростей деформирования, изменение скорости деформирования в процессе опыта.



Фиг. 5

3. На фиг. 2 приведены экспериментальные кривые растяжения в координатах напряжение — поперечная деформация для ВТ1-0. Данный материал обнаруживает значительный разброс (на фиг. 2 показаны крайние кривые, полученные в эксперименте).

Кривые 1, 1 соответствуют постоянной скорости  $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$ . Остальные кривые получены в опытах с постоянной скоростью перемещения захватов и поэтому в области перехода от упругого к упругопластическому состоянию скорость деформации не строго постоянна (кривые 2, 2 соответствуют  $\dot{\epsilon} = 1.6 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$ , 4, 4 —  $\dot{\epsilon} = 10^2 \text{ сек}^{-1}$ ; кривая 3 получена при  $\dot{\epsilon} = 10 \text{ сек}^{-1}$ , пунктирная кривая соответствует  $\dot{\epsilon} = 0$ ). Однако уже при малых пластических деформациях можно считать скорость деформации почти постоянной, так как модуль упрочнения намного меньше модуля упругости.

Кривая 5 получена при поворотном нагружении со скоростью  $\dot{\epsilon} = 10^2 \text{ сек}^{-1}$ . При этом первоначально образец деформировали до пластической деформации 0.42% со скоростью  $5 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$ .

На фиг. 3 представлены усредненные диаграммы деформирования для ОТ-4. На фиг. 4 приведены некоторые диаграммы сжатия для Ст. 3, полученные в экспериментах с постоянной скоростью деформации (кривая 1,  $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$ ) и с постоянной скоростью перемещения захватов  $v = \text{const}$  (кривые: 2 —  $v = 2 \cdot 10^{-1} \text{ м/сек}$ ; 3, 4 —  $v = 2 \text{ м/сек}$ ). Кривая 4 соответствует повторному нагружению с  $v = 2 \text{ м/сек}$ .

В этом опыте предварительная пластическая деформация 0.86% была получена при  $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$ . Кривая 5 соответствует опыту, где предварительная пластическая деформация 0.65% была получена при  $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$  ( $v_1 = 2 \cdot 10^{-1} \text{ м/сек}$ ,  $v_2 = 2 \text{ м/сек}$ ). Пунктирная кривая соответствует  $\dot{\epsilon} = 0$ .

На фиг. 5 показаны экспериментальные точки скоростной зависимости для ВТ1-0 (кривая 1) и ОТ-4 (кривая 2) при пластической деформации 0.5% и для Ст. 3 (кривые 3) при  $p = 2.45\%$  в полулогарифмических координатах и линейная аппроксимация этой зависимости.

Для всех испытанных материалов эксперименты проводились с многократным ступенчатым изменением скорости деформации в процессе одного опыта с целью вы-

яснения наследственных свойств. Эти опыты, а также опыты на повторное нагружение показали, что исследованные материалы не обладают наследственными свойствами по отношению к истории изменения скоростей пластической деформации или эффекты наследственности столь незначительны, что их трудно выделить вследствие естественного разброса характеристик для данных материалов. Отсутствие наследственных свойств у титанового сплава было также установлено в [8].

4. При обработке результатов испытаний с постоянной скоростью были приняты следующие аппроксимации для функций  $f_1$  и  $f_2$ :

$$f_i(x) = \frac{1}{K_i} \ln \left( \frac{x}{a_i} + 1 \right) \quad (4.1)$$

Сплав ВТ1-0 со следующими характеристиками:  $\sigma_0 = 20 \text{ кг/мм}^2$ ,  $K_1 = 0.68 \text{ мм}^2/\text{кг}$ ,  $a_1 = 8 \cdot 10^{-5}$ ,  $K_2 = 1.14 \text{ мм}^2/\text{кг}$ ,  $a_2 = 10^{-8} \text{ сек}^{-1}$ . Эти значения констант сохраняются во всем диапазоне изменения параметров.

Сплав ОТ-4: при  $p < 1.25 \cdot 10^{-3}$ ,  $\sigma_0 = 45.6 \text{ кг/мм}^2$ ,  $K_1 = 4 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2/\text{кг}$ ; при  $p > 1.25 \cdot 10^{-3}$ ,  $\sigma_0 = 55.4 \text{ кг/мм}^2$ ,  $K_1 = 6.6 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2/\text{кг}$ ;  $K_2 = 0.96 \text{ мм}^2/\text{кг}$ ,  $a_2 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ сек}^{-1}$ ,  $a_1 = 2.5 \cdot 10^{-3}$  — для всего диапазона.

Ст. 3:  $\sigma_0 = 21 \text{ кг/мм}^2$ ,  $K_1 = 2.16 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2/\text{кг}$ ,  $a_1 = 3.5 \cdot 10^{-2}$ ;  $p < 4 \cdot 10^{-1}$ ,  $K_2 = 3.5 \text{ мм}^2/\text{кг}$ ,  $a_2 = 1.6 \cdot 10^{-7} \text{ сек}^{-1}$ ; при  $p > 4 \cdot 10^{-1}$ ,  $K_2 = 0.4 \text{ мм}^2/\text{кг}$ ,  $a_2 = 10^0 \text{ сек}^{-1}$ .

5. Параметры уравнения (1.3) получены в результате исследования при стационарном режиме деформирования. Основной же интерес представляет вопрос о том, насколько правильно будет это уравнение описывать поведение материала при произвольном законе нагружения.

Для этого необходимо решить уравнение (1.3) при заданном  $\sigma(t)$  или  $e(t)$ . Поскольку  $a_2$  мало, то практически обычно выполняется условие  $p/a_2 \gg 1$ , что позволяет упростить уравнение (1.3) и привести его к виду

$$\left( \frac{p}{a_1} + 1 \right)^{K_2/K_1} = a_2 \exp[K_2(\sigma - \sigma_0)] dt$$

Если задана функция  $\sigma(t)$ , то

$$p = a_1 \left\{ \left[ \frac{a_2}{a_1 K_0} \int \exp[K_2(\sigma - \sigma_0)] dt + 1 \right]^{K_0} - 1 \right\}, \quad K_0 = \frac{K_1}{K_2 + K_1} \quad (5.1)$$

Пусть задано  $e(t)$ . Уравнение (1.3) нетрудно проинтегрировать при кусочно-линейной аппроксимации функции  $f_1(p)$ . В том случае, когда после достижения некоторых значений  $e_*$ ,  $p_*$  и  $\sigma_*$  деформация  $p$  меняется незначительно, можно записать

$$f_1(p) = f_1(p_*) + \frac{p - p_*}{E_*}, \quad E_* = \frac{1}{K_1(p_* + a_1)} \quad (5.2)$$

Исключая из уравнения (1.3) напряжение при помощи соотношения  $e = p - \sigma/E$  и интегрируя его при условии (5.2) и  $p/a_2 \gg 1$ , получим

$$p = p_* + \frac{1}{K_2(E + E_*)} \ln \left\{ a_2 K_2 (E + E_*) \int \exp[K_2 E (e - e_*)] dt + 1 \right\} \quad (5.3)$$

Из (1.3) с учетом (5.2) найдем выражение для изменения напряжения при релаксации

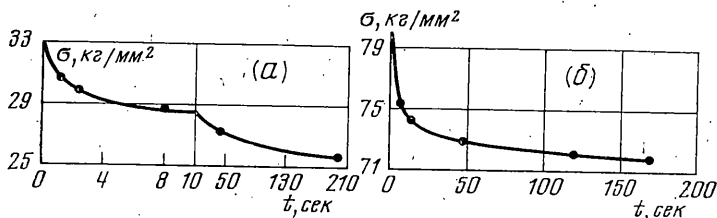
$$\sigma = \sigma_* - \frac{E}{K_2(E + E_*)} \ln \left\{ \frac{p_*}{a_2} (1 - \exp[-a_2 K_2 (E + E_*) t]) + 1 \right\}$$

где  $p_*$  — скорость пластической деформации непосредственно перед началом релаксации.

Если нагружать образец по некоторому закону и затем установить  $\sigma = \text{const}$ , то будет происходить ползучесть. На первом этапе ползучести, когда  $p \gg a_2$ , изменение деформации получим из (5.1). На втором этапе, когда  $p$  соизмеримо с  $a_2$ , деформация обычно меняется незначительно и можно использовать выражение (5.2). Для этого случая

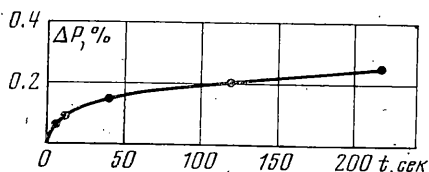
$$p = p_* + \frac{1}{K_2 E_*} \ln \left\{ \frac{p_*}{a^2} [1 - \exp(-a_2 K_2 E_* t)] + 1 \right\}$$

где  $p_*$  — скорость пластической деформации непосредственно перед началом ползучести.

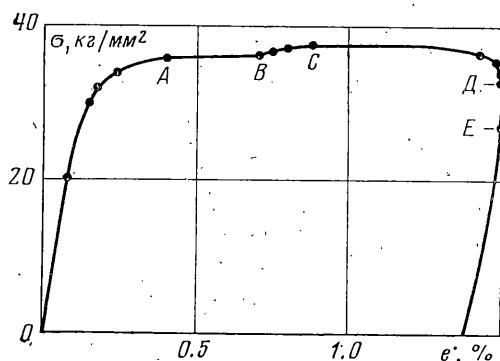


Фиг. 6

По приведенным выше формулам были приведены расчеты для различных случаев сложного нагружения. На фиг. 6, а показаны экспериментальные кривые кратковременной релаксации для ВТ1-0 при начальных значениях  $\sigma_* = 33 \text{ кг/мм}^2$ ,  $p_* = 0.65\%$ ,  $e_* = 5 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$ , а на фиг. 6, б — для ОТ-4 при  $\sigma_* = 79.5 \text{ кг/мм}^2$ ,  $p_* = 0.56\%$ ,  $e_* = 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$ . Точками показаны расчетные данные.



Фиг. 7



Фиг. 8

На фиг. 7 представлена кривая кратковременной ползучести для ОТ-4 при  $\sigma_* = 67 \text{ кг/мм}^2$ ,  $p_* = 0.18\%$ ,  $e_* = 4.5 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$  и нанесены расчетные точки.

На фиг. 8 приведена диаграмма, полученная при сложном законе деформирования образца из ВТ1-0. Первоначальное нагружение до точки А проводилось при  $\dot{\sigma} = 1.28 \text{ кг/мм}^2 \text{ сек}$ ; от точки А до точки В при  $\dot{\sigma} = 0$  (кратковременная ползучесть); из точки В до точки С, опять проводилось нагружение при  $\dot{\sigma} = 1.28 \text{ кг/мм}^2 \text{ сек}$ ; из точки С осуществлялась разгрузка при  $\dot{\sigma} = 0.13 \text{ кг/мм}^2 \text{ сек}$ . Точки соответствуют значениям, вычисленным на основе предложенных уравнений. Последние две точки соответствуют  $p = \dot{\sigma}/E$  (точка D) и  $p = 0$  (точка E).

Ниже для области упрочнения Ст. 3 (в опытах регистрировалась поперечная деформация) приведены сравнительные данные эксперимента и расчета для одного из испытанных образцов с параметрами уравнения:  $K_1 = 2.16 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2/\text{кг}$ ,  $K_2 = 3.55 \text{ мм}^2/\text{кг}$ ,  $a_1 = 1.77 \cdot 10^{-2}$ ,  $a_2 = 1.6 \cdot 10^{-7} \text{ сек}^{-1}$ .

При релаксации:  $e_* = 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$ ,  $p_* = 0.34 \cdot 10^{-2}$ ,  $\sigma_* = 31 \text{ кг/мм}^2$

$t, \text{сек}$	2.4	7.2	24	48
$\Delta\sigma, \text{кг/мм}^2$	1.06	1.35	1.59	1.65
$\Delta\sigma, \text{кг/мм}^2$	0.94	1.2	1.5	1.6

При ползучести:  $e_* = 6.8 \cdot 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$ ,  $p_* = 0.93 \cdot 10^{-2}$ ,  $\sigma_* = 44.5 \text{ кг/мм}^2$

$t, \text{сек}$	2.4	12	24	120
$\Delta p, \%$	0.076	0.10	0.114	0.14
$\Delta p, \%$	0.073	0.10	0.11	0.14

При догрузке с  $\dot{\sigma} = 10 \text{ кг/мм}^2/\text{сек}$ :  $p_* = 0.42 \cdot 10^{-2}$ ,  $\sigma_* = 33.5 \text{ кг/мм}^2$

$\Delta\sigma, \text{кг/мм}^2$	1	1.5	2	2.5
$\Delta e, \%$	0.008	0.0234	0.0452	0.069
$\Delta e, \%$	0.011	0.025	0.045	0.068

Экспериментальные данные приведены в третьих строках таблиц. Еще ниже приведены расчет и опытные данные для догрузки в области высоких скоростей деформирования от  $v = 0.2 \text{ м/сек}$  до  $v = 2 \text{ м/сек}$ :  $K_1 = 3.4 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2/\text{кг}$ ,  $K_2 = 0.324 \text{ мм}^2/\text{кг}$ ,  $a_1 = 2.05 \cdot 10^{-2}$ ,  $p_* = 2 \cdot 10^{-2}$ ,  $\sigma_* = 56 \text{ кг/мм}^2$

$\Delta e, \%$	0.02	0.048	0.12	0.26	0.58	0.83
$\Delta\sigma, \text{кг/мм}^2$	2.2	4.0	6.2	7.5	9.1	10.8
$\Delta\sigma, \text{кг/мм}^2$	1.6	2.4	4	6	9.0	10.8

Некоторое расхождение расчетных значений с опытом в первые моменты после увеличения скорости нагружения объясняется тем, что расчет производился при условии постоянной скорости, а вследствие конструктивных особенностей нагружающей системы (соударение пуансонов в масляной ванне, фиг. 1) в эксперименте скорость изменялась не скачком, а плавно в течение некоторого отрезка времени.

Разброс экспериментальных данных для ОТ-4 был мал и поэтому расчеты производились по усредненным значениям параметров уравнения (1.3). Ввиду того, что для ВТ1-0 и Ст. 3 разброс опытных данных был значительным, расчеты для этих материалов проводились не по средним значениям, а по значениям, которые определялись для рассматриваемого образца. Параметры  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $K_1$  и  $K_2$  определялись по диаграмме деформирования при ступенчатом изменении скорости деформации или нагружения.

6. Как уже указывалось, Ст. 3 имеет зуб текучести, который объясняется задержкой текучести согласно уравнению (1.4). На площадке текучести по образцу распространяется фронт пластической деформации, впереди фронта материал находится еще в упругом состоянии, за фронтом в пластическом.

Движение фронта происходит при практически постоянной нагрузке, скорость упругой деформации впереди фронта пренебрежимо мала, скорость пластической деформации в области за фронтом также незначительна, пластическое течение локализуется на малом участке, представляющии собою размытый фронт.

В [2, 9] предложены различные механизмы, объясняющие зависимость величины нижнего предела текучести и длины площадки от скорости растяжения. Не вдаваясь в детали, заметим, что в том и другом случае величина нижнего предела текучести определяется скоростью растяжения, т. е. скоростью движения захвата машины, и не зависит от длины образца.

Здесь эта зависимость определялась экспериментально и аппроксимировалась также логарифмической формулой вида (4.1)

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{1}{K_3} \ln \left( \frac{v}{a_3} + 1 \right) \quad (6.1)$$

Оказалось, что для диапазона значений параметров, относящихся к рассмотренному примеру:  $\sigma_0=27.5$  кг/мм<sup>2</sup>,  $K_s=1.84$  мм<sup>2</sup>/кг,  $a_s=1.6 \cdot 10^{-8}$  м/сек.

После достижения пластическим фронтом конца образца пластическая деформация происходит уже равномерно. При малом упрочнении можно считать скорость пластической деформации равной скорости полной деформации  $\dot{p} = v/l$ , где  $l$  — длина образца.

Величина нижнего предела текучести находится из уравнения (6.1). Подставляя значения  $\dot{p}$  в соотношение (1.3), получим уравнение диаграммы деформирования, соответствующей данной скорости растяжения. Пластическая деформация, соответствующая найденному значению нижнего предела текучести на этой диаграмме, представляет собою длину площадки текучести  $\Delta p$ .

Расчет по описанному способу при сообщенных выше значениях констант и длине образца  $l=20$  мм приводит к  $\Delta p=0.64 \cdot 10^{-2}$ , тогда как экспериментальные данные находятся в интервале  $0.5 \div 0.75 \cdot 10^{-2}$ .

Удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных при различных нестационарных процессах показывает на применимость предложенного уравнения к описанию исследованных материалов.

Поступила 22 VII 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М., «Наука», 1966.
2. Работнов Ю. Н., Суворова Ю. В. О законе деформирования металлов при одноосном нагружении. Изв. АН СССР. МТТ, 1972, № 4.
3. Johnston W. G., Gilman J. J. Dislocation velocities, dislocation densities and plastic flow in lithium fluoride crystals. J. Appl. Phys., 1959, vol. 30, No. 2.
4. Работнов Ю. Н. Модель упругопластической среды с запаздыванием текучести. ПМТФ, 1963, № 3.
5. Волошенко-Климовицкий Ю. Я., Вячеславов А. А., Мельшанов А. Ф. Аппаратура для испытаний материалов при скоростном нагружении. Заводск. лаборатория, 1963, № 4.
6. Волошенко-Климовицкий Ю. Я. Динамический предел текучести. М., «Наука», 1965.
7. Волошенко-Климовицкий Ю. Я., Мельшанов А. Ф. Электронно-осциллографическая установка для регистрации усилий и деформаций при ударных испытаниях материалов. Заводск. лаборатория, 1968, № 1.
8. Викторов В. В., Шапиро Г. С. Об определении динамических диаграмм растяжения металлов при умеренно-высоких скоростях деформаций. Инж. ж. МТТ, 1968, № 2.
9. Ломакин Е. В., Мельшанов А. Ф. Поведение малоуглеродистых сталей при растяжении. Изв. АН СССР. МТТ, 1971, № 4.