

УДК 539.376

## ПОЛЗУЧЕСТЬ МЕТАЛЛОВ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ПОСЛЕ ЧАСТИЧНОЙ РАЗГРУЗКИ

ЖУРОВ А. М.

Излагаются результаты испытаний малоуглеродистой стали и алюминиевого сплава Д16Т на ползучесть при комнатной температуре за пределами упругости, в том числе и после частичной разгрузки.

1. Вопросы, связанные с ползучестью металлов за пределами упругости при комнатной температуре, рассматривались ранее в [1, 2]. Эта ползучесть ныне учитывается инженерами в расчетах на прочность и жесткость металлических изделий, работающих при напряжениях, превышающих предел текучести.

За счет ползучести с течением времени возможен рост деформаций и перераспределение напряжений, определенных методами теории пластичности. Рассмотрим, всегда ли это возможно и насколько это перераспределение может измениться?

При исследовании ползучести металлов в условиях высоких температур была обнаружена приостановка ползучести после частичной разгрузки. Временный застой ползучести был положен в основу определения модуля Юнга в зависимости от температуры по данным измерений деформаций и напряжений при последующей ступенчатой разгрузке образца.

Этим методом были измерены модули упругости пяти металлов: сплава ником-80 при температурах до  $1100^{\circ}\text{C}$ , ст. 40ХМА — до  $700^{\circ}\text{C}$ , ст. ЭИ257 — до  $800^{\circ}\text{C}$ , титанового сплава ВТ1Д — до  $600^{\circ}\text{C}$  и лагуни — до  $500^{\circ}\text{C}$  [3].

Данные исследования предприняты для выяснения вопросов, связанных с ползучестью металлов после частичной разгрузки. Испытания были проведены на пяти-тонной крип-машине фирмы Шоппер, которая была подвергнута модернизации, сводившейся к замене тяг под образцы с нарезными головками. Образцы имели длину рабочей части 110 мм и диаметр около 10 мм. Деформации образцов измеряли прибором МК-3 с базой 50 мм.

Машина снабжена устройством для плавного нагружения испытательного образца и состоит из стойки, на которую опирается длинное плечо силового рычага с грузами. Через червячную пару электродвигатель перемещает стойку вверх или вниз с постоянной скоростью. При перемещении стойки вниз происходит нагружение образца.

Наибольшая скорость ползучести соответствует моменту окончания нагружения. Для фиксации этого момента использовано устройство, состоящее из микровыключателя и сигнальной низковольтной лампочки, которая загорается, когда стойка отходит от силового рычага. В момент загорания лампочки снимаются отсчеты по индикаторам прибора. Так удалось сравнительно надежно измерить начальные деформации нагруженных образцов.

Малоуглеродистая сталь в состоянии поставки испытана на ползучесть за пределами упругости при постоянных растягивающих напряжениях 245,3; 269,8; 294,3 и 343,4 МПа и при ступенчато убывающих напряжениях. Частичная разгрузка составляла 5% от начально действовавшего напряжения. Всего испытан 21 образец.

В табл. 1 приводятся следующие данные:  $N$  — номер образца,  $\sigma$  (МПа) — действующее напряжение,  $\varepsilon_0$  (%) — начальная деформация,  $\tau_1$  (мин) — время, прошедшее от начала ползучести до частичной разгрузки,  $\tau$  (ч) — полное время испытаний образца,  $\varepsilon$  (%) — накопленная деформация,  $\varepsilon''$  (%) — деформация чистой ползучести ( $\varepsilon'' = \varepsilon - \varepsilon_0$ ),  $\varepsilon'$  (%) — деформация, подсчитанная по линейному закону разгрузки с начальным модулем упругости 201100 МПа, и  $\varepsilon'_0$  (%) — измеренная деформация при полной разгрузке.

По данным табл. 1 прослеживается любопытная закономерность: полные накопленные деформации для одинаковых уровней напряжений примерно одинаковы, хотя начальные деформации заметно отличаются (образцы 4 и 22, 15 и 17). Происходит своего рода компенсация малой начальной деформации за счет ускоренной ползучести стали.

Установлено, что в области перехода из упругого состояния в пластическое малоуглеродистая сталь деформируется неоднородно, что проявляется в виде

Таблица 1

| №  | $\sigma$ | $\epsilon_0$ | $\tau_1$ | $\tau$ | $\epsilon$ | $\epsilon''$ | $\epsilon'$ | $\epsilon_i$ |
|----|----------|--------------|----------|--------|------------|--------------|-------------|--------------|
| 11 | 245,3    | 2,11         | 0        | 47     | 2,49       | 0,38         | 0,122       | 0,124        |
| 6  | 245,3    | 2,33         | 0        | 48     | 2,66       | 0,33         | —           | —            |
| 4  | 245,3    | 2,19         | 2        | 49     | 2,33       | 0,15         | 0,116       | 0,119        |
| 22 | 233      | 1,07         | 2        | 47     | 2,69       | 1,42         | —           | —            |
| 9  | 269,8    | 1,9          | 0        | 48     | 3,49       | 1,59         | 0,134       | 0,148        |
| 8  | 269,8    | 2,42         | 0        | 120    | 3,34       | 0,91         | 0,134       | 0,132        |
| 23 | 269,8    | 3,03         | 0        | 1248   | 3,64       | 0,60         | 0,134       | 0,140        |
| 3  | 269,8    | 2,56         | 2        | 72     | 3,24       | 0,69         | 0,127       | 0,129        |
| 10 | 256,3    | 2,21         | 2        | 48     | 3,14       | 0,94         | 0,127       | 0,135        |
| 26 | —        | 3,09         | 2        | 48     | 3,27       | 0,15         | 0,127       | 0,136        |
| 27 | 269,8    | 3,08         | 0,5      | 48     | 3,17       | 0,09         | 0,127       | 0,137        |

| №  | $\sigma$ | $\epsilon_0$ | $\tau_1$ | $\tau$ | $\epsilon$ | $\epsilon''$ | $\epsilon'$ | $\epsilon_i$ |
|----|----------|--------------|----------|--------|------------|--------------|-------------|--------------|
| 6  | 294,3    | 2,83         | 0        | 47     | 4,90       | 2,06         | 0,146       | 0,156        |
| 7  | —        | 2,34         | 0        | 768    | 3,85       | 1,51         | 0,146       | —            |
| 14 | 294,3    | 4,11         | 0        | 48     | 4,76       | 0,66         | 0,146       | 0,155        |
| 12 | 294,3    | 3,88         | 2        | 73     | 4,35       | 0,47         | 0,138       | 0,145        |
| 19 | 279,6    | 3,65         | 2        | 67     | 4,69       | 1,05         | 0,138       | 0,155        |
| 20 | —        | 3,93         | 2        | 71     | 4,60       | 0,67         | 0,138       | 0,137        |
| 15 | 343,4    | 7,88         | 0        | 71     | 10,17      | 2,28         | 0,171       | 0,20         |
| 17 | 343,4    | 4,02         | 0        | 47     | 10,70      | 6,68         | 0,171       | 0,194        |
| 13 | 343,4    | 6,20         | 2        | 48     | 9,24       | 3,04         | 0,162       | 0,189        |
| 18 | 326,2    | 6,79         | 2        | 48     | 9,25       | 2,74         | 0,162       | 0,197        |

медленно распространяющейся вдоль образца волны пластической деформации [4]. Возможно, что различие в значениях начальной деформации при одинаковых уровнях обусловлено указанной неоднородностью деформирования, которая может начать развиваться в одном случае на базе прибора, а в другом — за ее пределами.

В последних двух столбцах приведены данные о деформациях, возникающих на стадиях полной разгрузки и подсчитанные по линейному закону. Во всех случаях первые больше вторых. Отсюда следует, что сталь, подвергнутая ползучести, имеет закон разгрузки, отличной от линейного с начальным модулем упругости.

На фиг. 1, 2 представлены кривые чистой ползучести (полной деформации за вычетом начальной), полученные в результате осреднения данных двух (трех) испытаний;  $t$  (мин) — время. Опытные значения изображены светлыми точками для постоянных напряжений и крестиками для ступенчато уменьшенных напряжений по истечении двух минут после окончания нагружения. Темные точки соответствуют случаю, когда разгрузка с 269,8 до 256,3 МПа произведена через 0,5 мин. Цифры около крестиков и точек обозначают время в часах.

Видно, что ползучесть малоуглеродистой стали для использованных уровней напряжений ограничена. Примерно за два часа рост деформации ползучести практически прекращается. Даже при  $\sigma=343,4$  МПа за период от 2 до 47 ч деформация возросла всего на 0,03%.

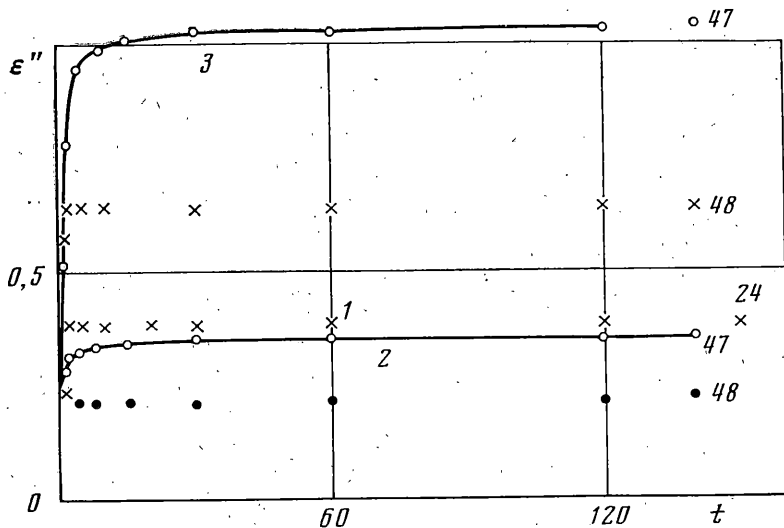
Крестики в режиме изменения напряжения 245,3–233 МПа (отмечено цифрой 1) расположились выше кривой ползучести при  $\sigma=245,3$  МПа (кривая 2). Это произошло из-за того, что средняя начальная деформация в первом случае оказалась меньше, чем во втором (кривая 3 на фиг. 1 соответствует  $\sigma=269,8$  МПа).

Кривые 1, 2 на фиг. 2 соответствуют  $\sigma=343,4$  и 294,3 МПа (кривые 3, 4 из крестиков относятся к  $\sigma=343,4-326,5$  и 294,3–279,6 МПа).

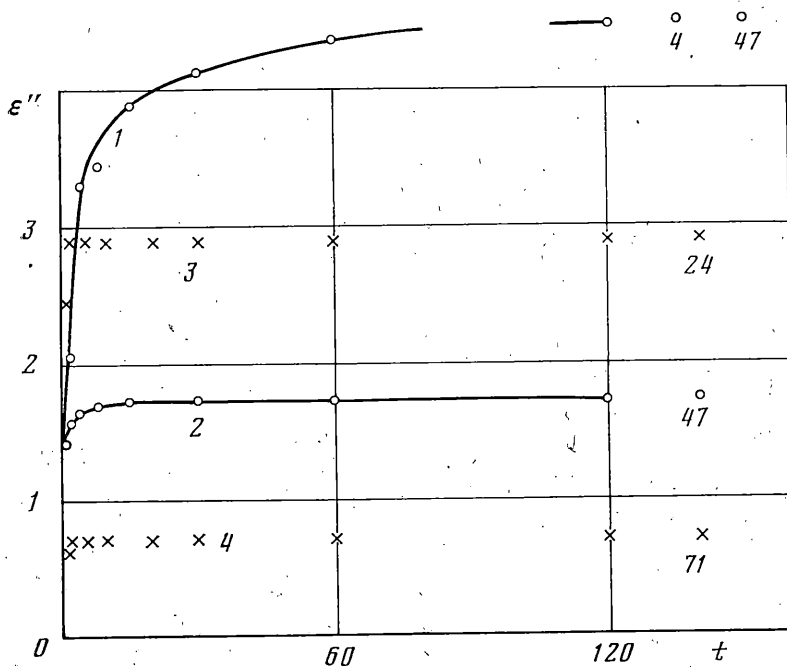
В статически неопределимых системах, находящихся в упругоэластическом состоянии, за счет ползучести возникает частичная разгрузка в наиболее напряженных элементах конструкции. Эта разгрузка приостановит ползучесть и тем самым мало изменит распределение усилий и напряжений, определенных существующими методами теории пластичности, т. е. в расчетах статически неопределимых систем можно не учитывать ползучесть металлов при комнатной температуре за пределами упругости.

В статически же определимых системах частичная разгрузка вследствие ползучести не может возникнуть, поэтому необходимо учитывать ползучесть при определении деформирования этих систем во времени.

Девять образцов, испытанных на ползучесть, были затем испытаны на разрывной машине до разрушения. С доверительной вероятностью в 95% условный предел



Фиг. 1



Фиг. 2

прочности оказался равным  $\sigma_b = 374,7 \pm 9,8$  МПа. Коэффициент вариации составил 3,5%.

2. На той же машине с использованием того же тензметра испытано на ползучесть 24 образца из алюминиевого сплава Д16Т. В рассматриваемой серии несколько изменена методика испытаний. Испытаниям на ползучесть предшествовали испытания на разрывной машине для определения модуля Юнга  $E$ , предела пропорциональности  $\sigma_p$  и предела текучести  $\sigma_s$  по допуску 0,1% остаточного относительного удлинения. Нагружение производилось до уровня напряжения, несколько меньшего  $\sigma_s$ . Предел текучести определяли приближенно по продолженной кривой нелинейного деформирования.

При испытаниях материал не доводился до развитых пластических деформаций. Последние затруднили бы выяснение вопроса о минимальном уровне напряжений, с которого начинается ползучесть сплава.

Основные результаты испытаний сплава Д16Т представлены в табл. 2. Данные

Таблица 2

| №  | E     | $\sigma_p$ | $\sigma_s$ | $\sigma$ | $\varepsilon_0$ | $\tau_1$ | $\tau$ | $\varepsilon$ | $\varepsilon''$ | $\sigma_b$ |
|----|-------|------------|------------|----------|-----------------|----------|--------|---------------|-----------------|------------|
| 1  | —     | —          | —          | 441,5    | 1,09            | —        | 71     | 1,27          | 0,19            | 544,5      |
| 6  | —     | —          | —          | 441,5    | 1,01            | —        | 71     | 1,22          | 0,21            | 537,6      |
| 2  | —     | —          | —          | 446,0    | 2,08            | —        | 48     | 2,50          | 0,42            | 540,5      |
| 3  | —     | —          | —          | 446,0    | 2,04            | —        | 120    | 2,61          | 0,57            | 537,6      |
| 20 | 71910 | —          | —          | 466,0    | 1,28            | —        | 50     | 3,00          | 1,72            | 540,5      |
| 21 | —     | —          | —          | 466,0    | 2,04            | —        | 912    | 3,06          | 1,02            | 538,6      |
| 22 | —     | —          | —          | 466,0    | 1,39            | —        | 24     | 4,43          | 2,74            | 520,9      |
| 4  | —     | —          | —          | 442,7    | 1,96            | 1        | 47     | 2,25          | 0,64            | 539,6      |
| 5  | —     | —          | —          | —        | 2,04            | 1        | 48     | 3,39          | 1,35            | 524,8      |
| 19 | 72010 | —          | —          | —        | 1,04            | 1        | 46     | 2,56          | 1,51            | 541,5      |
| 11 | 73970 | 343,4      | 386,5      | 480,7    | 2,14            | —        | 336    | 3,07          | 0,70            | 524,8      |
| 12 | 74360 | 313,9      | 360,6      | —        | —               | —        | —      | —             | —               | 514,0      |
| 18 | 72100 | 343,4      | 419,9      | 457,7    | 2,20            | 1        | 96     | 3,63          | 1,43            | 538,6      |
| 7  | —     | —          | —          | 490,5    | 2,31            | —        | 48     | 3,23          | 0,90            | 535,6      |

| №  | E     | $\sigma_p$ | $\sigma_s$ | $\sigma$ | $\varepsilon_0$ | $\tau_1$ | $\tau$ | $\varepsilon$ | $\varepsilon''$ | $\sigma_b$ |
|----|-------|------------|------------|----------|-----------------|----------|--------|---------------|-----------------|------------|
| 8  | 75050 | 343,4      | —          | 490,5    | 2,51            | —        | 48     | 4,00          | 1,49            | 531,7      |
| 9  | 74260 | 392,4      | —          | 466,0    | 2,92            | 2        | 70     | 3,67          | 0,75            | 526,8      |
| 10 | 73970 | 343,4      | 387,5      | —        | 2,44            | 2        | 216    | 2,92          | 0,48            | 526,8      |
| 23 | —     | —          | —          | 500,3    | 3,56            | —        | 144    | 6,72          | 3,16            | 522,9      |
| 24 | —     | —          | —          | 500,3    | 1,50            | —        | 120    | 3,08          | 1,58            | 539,6      |
| 13 | 74460 | 333,5      | —          | 402,2    | 0,409           | —        | 70     | 0,504         | 0,005           | —          |
|    |       |            |            | 421,8    | 0,76            | —        | 26     | 0,80          | 0,04            | —          |
|    |       |            |            | 431,6    | 0,83            | —        | 72     | 0,92          | 0,09            | 531,7      |
| 16 | 75240 | 363,0      | 418,9      | 404,2    | 0,486           | —        | 23     | 0,513         | 0,027           | —          |
|    |       |            |            | 424,0    | 1,474           | —        | 49     | 1,556         | 0,093           | 537,6      |
| 17 | 73480 | 343,4      | 398,3      | 396,3    | 0,473           | —        | 48     | 0,487         | 0,014           | —          |
|    |       |            |            | 398,3    | 0,498           | —        | 144    | 0,498         | 0               | 536,6      |
| 14 | 73970 | 294,3      | 394,4      | 394,4    | 0,52            | —        | 23     | 0,56          | 0,04            | 546,4      |
| 15 | 73770 | 382,6      | 436,5      | 436,5    | 0,61            | —        | 96     | 1,58          | 0,97            | 532,7      |

этой таблицы использованы для определения  $E$ ,  $\sigma_p$  и  $\sigma_s$  при доверительной вероятности 95%. Получены следующие значения этих характеристик:  $E=73730 \pm 660$  МПа,  $\sigma_p=345 \pm 20$  МПа и  $\sigma_s=402 \pm 17$  МПа. Коэффициенты вариации соответственно равны 1,9; 8 и 5%.

На фиг. 3 точками изображены условные пределы прочности в зависимости от накопленной деформации за счет силового воздействия и ползучести. Там же построена наклонная прямая, уравнение которой  $\sigma_b=544 \pm 3,4 \varepsilon$  получено на основе корреляционно-регрессионного анализа ( $\varepsilon$  выражено в процентах). Для  $\varepsilon=6,72\%$  предел прочности  $\sigma_b$  уменьшается на 4,2%. Обнаруженное уменьшение прочности, по-видимому, связано с накоплением повреждений за период ползучести сплава.

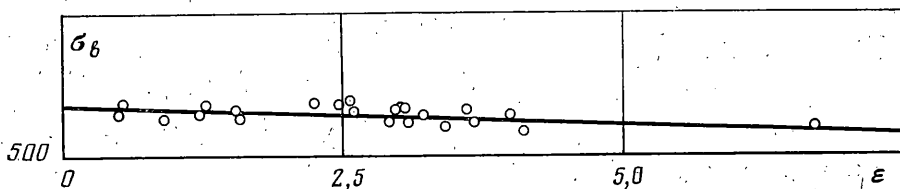
Анализируя данные табл. 2, можно заметить наличие большого различия начальных деформаций при одинаковых уровнях напряжений. При  $\sigma=500,3$  МПа, например, у образца № 24  $\varepsilon_0=1,5\%$ , а у образца № 23  $\varepsilon_0=3,56\%$ , т. е.  $\varepsilon_0$  различается более чем в два раза. При  $\sigma=466$  МПа на образце № 19 получено  $\varepsilon_0=1,04\%$ , а на образце № 21 получено  $\varepsilon_0=2,04\%$ . Вновь получилось различие почти в два раза.

Есть основания предполагать, что отмеченное различие в  $\varepsilon_0$  обусловлено неоднородным деформированием сплава, аналогичным тому, которое обнаружено на малоуглеродистой стали.

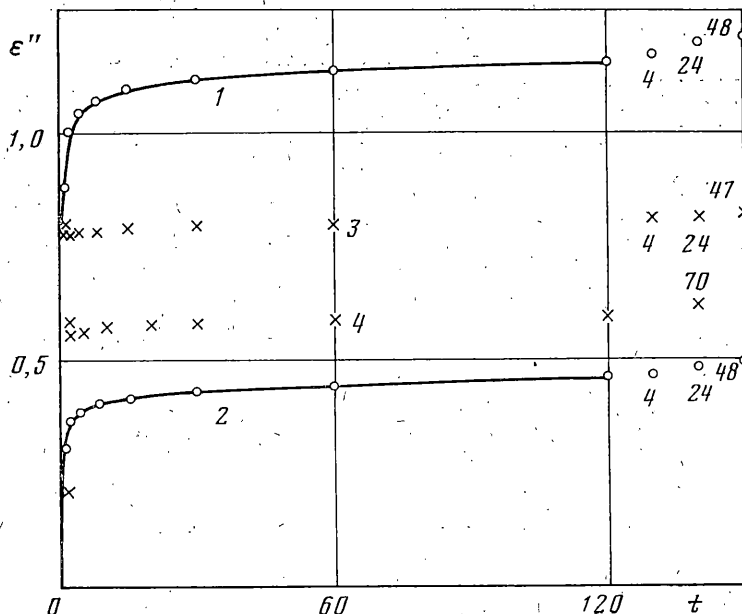
Рассмотрим результаты испытаний образца № 17. Для него  $\sigma_p=343,4$  МПа и  $\sigma_s=398,3$  МПа. При  $\sigma=396,3$  и  $\sigma=398,3$  МПа ползучесть практически отсутствовала. Аналогичные результаты были получены на образце № 16. При напряжении, большем  $\sigma_p$ , но меньшем  $\sigma_s$ , ползучесть отсутствовала. При напряжении, несколько большем  $\sigma_s$ , появилась ползучесть, достигшая 0,09% за 49 ч.

Из проведенного анализа заключаем, что в промежутке между  $\sigma_p$  и  $\sigma_s$  сплав не ползет. Ползучесть начинается при напряжениях, больших предела текучести.

На фиг. 4 точками изображены кривые ползучести (1, 2) при постоянных напряжениях ( $\sigma=490,5$  и 466 МПа), а крестиками — кривые ползучести (3, 4) после 5%-ной разгрузки ( $\sigma=466-442,7$  и 490-466 МПа). Из графиков видно, что в течение 48 ч при постоянных напряжениях ползучесть продолжала нарастать. Образец № 21 при  $\sigma=466$  МПа испытывали на протяжении 912 ч. Рост деформации во времени прекратился начиная с 576 ч. Иначе говоря, ограниченная ползучесть сплава Д16Т наступает по истечении значительного времени.



Фиг. 3



Фиг. 4

Частичная разгрузка приводит к резкому изменению ползучести сплава. Рост деформации во времени почти прекращается.

Кривая ползучести при  $\sigma = 466-442,7$  МПа расположилась выше кривой для  $\sigma = 490,5-466$  МПа. Это произошло вследствие различия средних значений начальных деформаций. Для  $\sigma = 466$  МПа  $\epsilon_0 = 1,76\%$ , а для  $\sigma = 466-442,7$  МПа деформация  $\epsilon_0 = 1,38\%$ . За счет начальной деформации вторая кривая завышена на  $0,38\%$ . Для  $\sigma = 490,5$  МПа начальная деформация  $\epsilon_0 = 2,41\%$ , а для  $\sigma = 490,5-466$  МПа  $\epsilon_0 = 2,68\%$ . Отсюда следует, что вторая кривая занижена на  $0,27\%$  по отношению к первой. Этим различием  $\epsilon_0$  следует объяснить anomальное расположение кривых ползучести после частичной разгрузки.

Из-за малого числа испытаний и большого разброса свойств сплава кривые ползучести при других уровнях напряжений на фиг. 4 не представлены.

Результаты измерений деформаций на стадии полной разгрузки показали, что эти деформации больше подсчитанных по линейному закону разгрузки с начальным модулем упругости. Отсюда следует, что и для сплава Д16Т разгрузка после ползучести следует закону, отличному от линейного.

Если у малоуглеродистой стали конечная деформация при фиксированном уровне напряжений была примерно одинакова, несмотря на заметное различие начальной деформации, то у сплава Д16Т наблюдается закономерность: малым  $\epsilon_0$  соответствует малое  $\epsilon$  и наоборот (образец 23 и 24, 3 и 4 и др.). Исключение составляет образец № 22 в сравнении с другими, испытанными при  $\sigma = 466$  МПа.

К концу испытаний алюминиевого сплава было создано автоматическое устройство, позволившее фотографировать показания индикаторов прибора МК-3 и расположенного рядом с ним секундомера в тот момент, когда стойка отходила от силового рычага. На одном из образцов начальная деформация, измеренная визуально, равна  $1,282\%$ , а по кинолентке —  $1,25\%$ . Разница в  $\epsilon_0$  составляет  $0,032\%$ . Она обусловлена естественным запаздыванием снятия визуальных отсчетов с момента загорания лампочки, но указанная разница мала.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы: ползучесть малоуглеродистой стали прекращается по истечении 2 ч (5%-ная

частичная разгрузка, производимая через малые времена после окончания нагружения, имеет результатом полную приостановку ползучести); прекращение ползучести сплава Д16Т наступает по прошествии около 580 ч (5%-ная разгрузка приводит к значительному снижению ползучести); ползучесть сплава Д16Т начинается при напряжениях, больших или равных пределу текучести; условный предел прочности сплава Д16Т уменьшается за счет накопленной при ползучести деформации; металлы, подвергшиеся ползучести, имеют закон разгрузки, отличный от линейного с начальным модулем упругости.

За участие в опытах и обработке их результатов благодарю В. Б. Сопотову.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков А. М. Деформационная анизотропия и ползучесть малоуглеродистой стали при нормальной температуре. — Инж. ж., 1961, т. 1, № 4, с. 150—153.
2. Жуков А. М. Ползучесть цветных металлов при комнатной температуре за пределами упругости. — Инж. ж., 1963, т. 3, № 2, с. 409—413.
3. Жуков А. М. Зависимость модуля упругости и коэффициента линейного расширения от температуры для некоторых металлов. — Изв. АН СССР. ОТН. Механ. и машиностр., 1959, № 4, с. 173—175.
4. Жуков А. М. Деформирование малоуглеродистой стали при фиксированных скоростях нагружения. — Проблемы прочности, 1974, № 12, с. 26—30.

Москва

Поступила в редакцию  
9.VIII.1983.

УДК 539.3:534.1

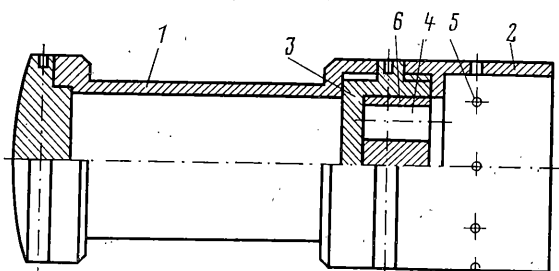
### ПОВЕДЕНИЕ ПРИ ОСЕВОМ УДАРЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, НЕСУЩЕЙ МАССУ НА НЕКОНТАКТИРУЕМОМ ТОРЦЕ

БРИГАДИРОВ Г. В., ТОЛОКОННИКОВ Л. А.

Приводятся некоторые результаты экспериментальных исследований эффектов осевого удара о жесткую преграду цилиндрической оболочки, несущей массу на неконтактируемом торце.

1. Специальная установка позволяла создавать разнообразные вертикальные скорости движения цилиндрической оболочки вдоль ее оси. Можно изменять геометрические параметры оболочки, материал, величину присоединенной массы. Кинематические характеристики движения точек оболочки регистрировались посредством фотоприборов.

Теоретическому и экспериментальному изучению поведения цилиндрических оболочек при ударном нагружении посвящен ряд публикаций советских и зару-



Фиг. 1

бежных авторов [1—7]. В большинстве из них исследования связаны с упругими состояниями достаточно тонких неподвижных цилиндрических оболочек, по которым наносится удар падающей массой. Основное внимание при исследованиях уделялось анализу процессов поперечного волнообразования.

Описываемые эксперименты проводились с подвижными образцами при изменении параметров оболочки и условий нагружения в достаточно широком диапазоне. Проводилась регистрация продольных перемещений присоединенной массы, отмечалась качественная картина форм выпучивания оболочек и остаточных деформаций.