

## ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА УПРУГИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

Проанализированы исследования, посвященные изменению упругих свойств металлов в результате их пластического деформирования, а также методы определения кривых нейтрального нагружения.

При определении кривой нейтрального нагружения на трубчатых образцах из технически чистого алюминия в каждом образце внутренним давлением создавалась окружная деформация  $\varepsilon_\theta$  около 2%. После полной разгрузки и обмера образца он повторно подвергался двухосному растяжению по смежному лучу в координатах  $\sigma_z - \sigma_\theta$ . Значения  $\sigma_z$  и  $\sigma_\theta$  были подсчитаны с учетом изменившихся размеров поперечного сечения образца в результате первого нагружения.

Здесь и в последующем толщину стенки образца измеряли прибором, описанным в [1], а деформации – приборами, описанными в [2] и оптико-механическим прибором Мартенса. Для увеличения точности углы поворота последнего прибора измеряли посредством изогнутых по заданному радиусу линейек. Расстояние от зеркальца до линеек, естественно, соответствовало радиусу кривизны линеек.

Было обнаружено наличие начального линейного участка на кривой  $\sigma_\theta(\varepsilon_\theta)$  при первом и втором нагружении. В этом можно убедиться по графикам на фиг. 1, где цифры I и II соответствуют 1-му и 2-му нагружениям.

Из опытов на растяжение в продольном и поперечном направлениях были получены модули упругости 75,5 и 74,6 ГПа соответственно, а из опыта на чистое кручение был определен модуль сдвига, равный 28,4 ГПа. При последующей обработке опытных данных было принято  $E=75,5$  ГПа и  $\mu=0,33$ .

Для теоретического наклона начального линейного участка кривой  $\sigma_\theta(\varepsilon_\theta)$  использована формула  $\sigma_\theta/\varepsilon_\theta = E/(1-\mu k)$ , где  $k = \sigma_z/\sigma_\theta$ . Опытные и теоретические наклоны  $\sigma_\theta/\varepsilon_\theta$  приведены в табл. 1, где  $\delta$  – отношение (в %) разности теоретического  $(\sigma_\theta/\varepsilon_\theta)_t$  и опытного  $(\sigma_\theta/\varepsilon_\theta)_e$  наклонов (в ГПа) к опытному наклону. Значения опытных наклонов данной таблицы и аналогичной таблицы в [3] несколько различаются вследствие того, что в представленной здесь таблице они определены способом наименьших квадратов, а в таблице [3] – по графикам.

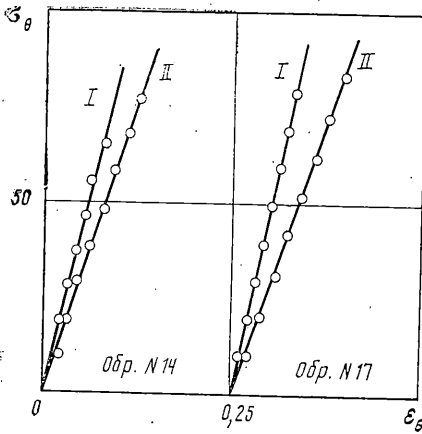
Для доверительной вероятности 95%, которая сохраняется и в последующем, среднее значение опытного наклона в первом нагружении равно  $89,3 \pm 5,2$  ГПа при коэффициенте вариации  $v=4,6\%$ . Оно отличается от теоретического наклона всего на 0,34%.

Различие же в наклонах при повторном нагружении, как видно из табл. 1, весьма заметно. Легко усмотреть, что опытный наклон с ростом  $\sigma_z/\sigma_\theta$  растет. Корреляционным анализом получено следующее уравнение линии регрессии в ГПа:  $\sigma_\theta/\varepsilon_\theta = 11,9 + 103,1 \sigma_z/\sigma_\theta$  с коэффициентом корреляции  $r=0,884$ . Оно изображено наклонной прямой на фиг. 2, а точками – опытные значения наклонов.

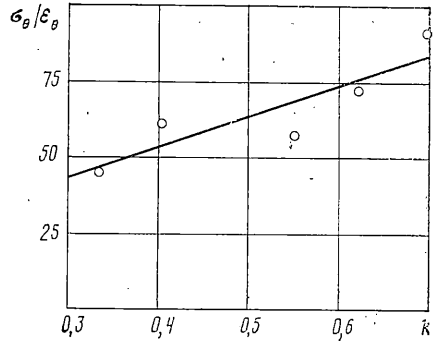
Кривая нейтрального нагружения по методу разгрузок была также определена в условиях растяжения с кручением на трубчатых образцах из стали 45, подвергнутой отжигу при температуре 900°С. В этой серии опытов каждый образец деформи-

Таблица 1

Образец	$k$	$(\sigma_\theta/\varepsilon_\theta)_e$	$(\sigma_\theta/\varepsilon_\theta)_t$	$\delta$
15	0,475	84,0	89,6	6,7
	0,333	44,9	84,9	89,1
14	0,475	89,6	89,6	0
	0,403	60,8	87,1	43,3
17	0,475	87,8	89,6	2,1
	0,549	57,6	92,2	60,1
18	0,475	89,6	89,6	0,2
	0,621	73,6	95,0	29,1
19	0,475	95,5	89,6	-6,2
	0,697	91,3	99,1	8,5



Фиг. 1



Фиг. 2

ровали чистым растяжением до  $\varepsilon$  около 2%, полностью разгрузили, измеряли новые поперечные размеры и вновь нагружали растяжением с кручением вдоль прямых в координатах  $\sigma$ - $\tau$ , которые вычисляли с учетом измененных размеров поперечных сечений.

При повторных нагружениях вновь обнаружены начальные линейные участки кривых  $\sigma(\varepsilon)$  и  $\tau(\gamma)$ . Существование их демонстрируют, например, графики на фиг. 3 при наименьшем значении  $\tau/\sigma=0,076$ . Ему соответствуют малые начальные деформации сдвига.

Один образец был подвергнут чистому кручению до  $\gamma=4,2\%$ , в результате которого получено  $G=78,8$  ГПа и  $\tau_s=158$  МПа. После полной разгрузки образец растянули и получили наклон начального линейного участка, равный 156 ГПа и  $\sigma_s=287$  МПа. Он отличается от  $E$  на 22,5%.

В табл. 2 собраны результаты испытаний на растяжение и повторное нагружение в условиях растяжения с кручением. Здесь приняты обозначения:  $\sigma_k$  и  $\varepsilon_k$  — конечное напряжение (МПа) и относительное удлинение (%) при чистом растяжении,  $E$  — модуль упругости (ГПа) и  $\sigma_s$  — предел текучести при растяжении (МПа),  $\sigma/\varepsilon$  и  $\tau/\gamma$  — наклоны (ГПа) начальных линейных участков на кривых  $\sigma(\varepsilon)$  и  $\tau(\gamma)$  при растяжении с кручением,  $\sigma_s$  и  $\tau_s$  — пределы текучести (МПа) при втором нагружении по допуску 0,1 и 0,15% остаточной деформации соответственно (они определены с учетом измененных наклонов линейных участков),  $\varphi$  — угол (рад) между направлением наибольшего главного напряжения и продольной осью образца.

Статистическая обработка данных табл. 2 позволила получить  $E=201 \pm 8$  ГПа,  $\sigma_s=267 \pm 7$  МПа и  $\sigma/\varepsilon=171 \pm 40,6$  (ГПа) при  $r=0,974$ . Наклон  $\sigma/\varepsilon$  растет с ростом  $\tau/\sigma$ . Максимальное отличие  $\sigma/\varepsilon$  от  $E$  составляет 13,4% по отношению к  $E$ .

При повторном растяжении с кручением наклон  $\tau/\gamma$  практически не зависит от  $\tau/\sigma$ . Оказалось, что  $\tau/\gamma=74 \pm 3,5$  ГПа. Среднее значение  $\tau/\gamma$  стало меньше  $G$  на 6,1%.

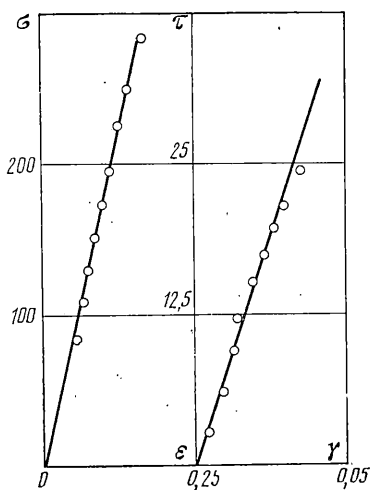
Приведенные данные свидетельствуют о том, что пластическое деформирование металлов, как правило, существенно изменяет их упругие свойства.

Следует заметить, что кривые нейтрального нагружения и при уменьшенном в два раза допуске на остаточную деформацию остались гладкими (без угловых особенностей) и для алюминия и для стали 45.

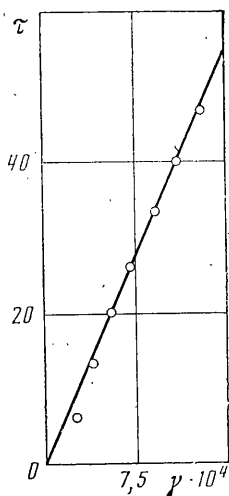
На трубчатом образце из стали 30ХГСА в отожженном состоянии были выполнены опыты, в результате которых получены  $E=201$  ГПа и  $G=72,9$  ГПа. Растяжение образца производилось до  $\sigma_k < \sigma_{s0}$  и чистое кручение до  $\tau < \tau_{s0}$ .

Таблица 2

Образец	$\tau/\sigma$	$\sigma_k$	$\varepsilon_k$	$E$	$\sigma/\varepsilon$	$\sigma_{s0}$	$\sigma_s$	$\tau/\gamma$	$\tau_s$	$\varphi$
5	0	338	2,2	200	—	263	—	64,2	162	0
6	0,076	333	2,05	213	174	263	331	74,1	34,3	0,111
7	0,187	318	—	199	179	277	299	75,6	55,9	0,179
8	0,284	325	2,02	197	180	267	294	75,3	81,4	0,258
9	0,373	330	2,04	200	187	265	276	70,8	103,0	0,320



Фиг. 3



Фиг. 4

Тот же образец затем подвергали кручению при разных фиксированных растягивающих напряжениях. По измеренным  $\tau$  и  $\gamma$  находили наклоны линейных участков. В результате этих опытов было получено

$\sigma$ , МПа	99,1	198,2	297,2	396,3	495,4	649,4
$\tau/\gamma$ , ГПа	72,2	70,4	69,7	71,3	72,8	36,6

Для  $\sigma < \sigma_{s0}$  наклон  $\tau/\gamma = 71,5 \pm 1,4$  ГПа. Он отличается от  $G$  всего на 1,9%. При  $\sigma$  же, большем  $\sigma_{s0}$  различие составляет 49,5%.

Приведенные данные говорят о том, что в испытательной машине удовлетворительно соблюдалась независимость действия силы  $P$  и момента  $M$ , а также о надежности измерений. Поэтому уменьшение почти в два раза наклона  $\tau/\gamma$  после перевода стали в пластическое состояние можно объяснить только резким изменением ее свойств. То, что на кривой догрузки существует линейный участок, доказывает график на фиг. 4.

За период догрузки до  $\tau = 46,7$  МПа осевая деформация возросла с 1,02 до 1,32%. После снятия крутящего момента и уменьшения растягивающего напряжения до некоторого уровня производили закручивание образца. Этот процесс повторялся пять раз. В результате получено:

$\sigma$ , МПа	494,4	388,5	282,5	141,3	0
$\tau/\gamma$ , ГПа	67,1	69,8	71,2	72,5	72,5

Из этой таблицы видно, что по мере убывания  $\sigma$ , при котором происходила догрузка крутящим моментом, наклон  $\tau/\gamma$  возрастал и приближался к модулю сдвига стали в исходном состоянии. При вычислениях  $\tau$  и  $\gamma$  произведен учет изменений размеров поперечного сечения образца за счет его пластического деформирования.

Наличие начального линейного участка на кривой нагрузки  $\tau(\gamma)$  за пределами упругости с наклоном, много меньшим модуля сдвига было обнаружено на стали 20. Уточнить наклоны, приведенные в [4], по способу наименьших квадратов не представляется возможным из-за того, что журнал испытаний этой стали не сохранился.

В [3] приведены данные о  $\sigma/\varepsilon$  и  $\tau/\gamma$  после пластического деформирования кручением и растяжением стали 45, полученные из графиков. Они отличаются от подсчитанных по способу наименьших квадратов в обоих случаях всего на 0,6%.

Если сравнить значения  $\tau/\gamma$ , полученные на стали 30ХГСА при возрастающих и убывающих  $\sigma$  с данными [5], то получим, что уточненные значения наклонов отличаются от наклонов, полученных из графиков, самое большее на 4%. Для стали 20 минимальное отличие наклона от модуля сдвига по отношению к последнему составляет 37,5%.

Результат, схожий с нашим, был получен в [6] на алюминиевом сплаве 24S-T4. Для нагружения, близкого к ортогональному, в статье приведены графики  $\tau(\gamma)$  для двух образцов. Согласно им, при догрузке крутящим моментом при  $\sigma$  около 345 МПа имеются участки с наклоном, отличающемся от модуля сдвига на 59,9%.

Пять образцов испытано при  $\Delta\sigma/\Delta\tau = -0,5$ . Для них  $\delta = (Q - \tau/\gamma)/G$  находится в пределах 44–50,3%. Два образца были испытаны в условиях  $\Delta\sigma/\Delta\tau = 1$ . Для них по-

лучено  $\delta$ , равное 64,5 и 67,6%. Значение  $\delta=5,4\%$  было получено на образце, испытанном при  $\Delta\sigma/\Delta\tau=-2$ , т. е. в условиях заметного убывания  $\sigma$ .

Отличные от нуля значения  $\delta$  авторы статьи [6] объясняют начальной анизотропией сплава, которая в опытах на чистое растяжение в осевом и окружном направлении не проверяли. Такое объяснение нельзя считать правомерным. Оно по существу предполагает, что пластическая деформация не вызывает деформационной анизотропии металла.

В опытах [3, 4] ст. 45 и ст. 30ХГСА в исходном состоянии были изотропны. Обнаруженные отклонения  $\sigma/\epsilon$  и  $\tau/\gamma$  от  $E$  и  $G$  соответственно были обусловлены анизотропией, возникшей за счет пластического деформирования сталей.

Статья [7], преимущественно посвященная определению начальной и последующих кривых нейтрального нагружения в условиях растяжения с кручением, проходящих через точку  $\sigma \approx 262$  МПа и  $\tau=0$ . Она соответствует пределу пропорциональности при растяжении сплава 24S-T4. Трубчатые образцы этого сплава были изготовлены из круглых прутков, подвергнутых длительному старению.

Как отмечено в [7], шесть образцов были испытаны растяжением в пластическую область, а затем были подвергнуты дополнительному растяжению с кручением. Для двух образцов приведены траектории нагружения и графики кривых догрузки  $\tau(\gamma)$ .

Разберем результаты испытаний образца № 114, который был вытянут до  $\epsilon=0,9\%$  ( $\sigma \approx 326$  МПа). Второй участок траектории нагружения до  $\tau=12,5$  МПа представлял отрезок прямой  $\Delta\sigma/\Delta\tau=0,44$ . За ним следовало чистое кручение при  $\sigma \approx 331$  МПа. На кривой догрузки  $\tau(\gamma)$  второму участку соответствовала прямая с наклоном 24,3 ГПа, который отличается от  $G$  на 2,8%.

Третьему участку нагружения соответствует линейный участок кривой  $\tau(\gamma)$ , на котором лежит шесть точек. Его наклон составляет 14 ГПа. Для него  $\delta=44\%$ .

В разбираемых опытах использована та же установка кинематического типа и та же измерительная аппаратура, что в [6]. За период третьего этапа нагружения вследствие релаксации осевого напряжения на кривой  $\sigma(\epsilon)$  должно наблюдаться падение  $\sigma$ , а не его возрастание (фиг. 7, а). Кстати, падение зафиксировано в [6] графиками на фиг. 13, а и 14, а.

Отмеченное обстоятельство говорит о какой-то неисправности в измерениях усилий и деформаций при испытаниях в условиях сложного нагружения. Оно вселяет сомнение в части достоверности полученных результатов.

До сих пор наклоны начальных линейных участков кривых деформирования  $\sigma(\epsilon)$  и  $\tau(\gamma)$  при сложном нагружении мы преднамеренно отличали от  $E$  и  $G$ , так как  $\sigma/\epsilon$  и  $\tau/\gamma$  не остаются неизменными, а зависят от ряда факторов.

Выше было показано, что после того, как было получено  $\tau/\gamma=36,6$  ГПа, ступенчатое уменьшение  $\sigma$  с малыми последующими догрузками  $M$  привело к возрастанию  $\tau/\gamma$ . При  $\sigma=0$   $\tau/\gamma$  практически стало равным  $G$ . Таким образом ступенчатые разгрузки с догрузками имели результатом восстановление упругих свойств стали.

В [5, 8] обнаружено, что  $\sigma/\epsilon$  и  $\tau/\gamma$  после пластического деформирования металла возрастают за счет отдыха (естественного старения).

На образце № 6 из стали 30ХГСА в упругой области были измерены модули упругости на растяжение  $E_+=199,2$  ГПа и сжатие  $E_-=200,6$  ГПа. Модули упругости отличаются всего на 0,7%. После его растяжения до  $\epsilon=1,45\%$ , он был разгружен и сразу же подвергнут сжатию до  $\epsilon=-0,81\%$ . На кривой сжатия имеется начальный линейный участок с наклоном 121,1 ГПа. Он отличается от  $E_-$  на 39,6%. После отдыха в течение 79 сут. этот образец был вновь подвергнут сжатию. Наклон начального линейного участка стал равен 191,1 ГПа. Он отличается от  $E_-$  всего на 4,7%.

Приведенные данные говорят, что за счет естественного старения модули упругости пластически деформированной стали почти полностью восстановились. Старение имело результатом и заметное повышение пределов пропорциональности и текучести по сравнению с соответствующими пределами при сжатии сразу после пластического растяжения.

В [9] приведены численные значения  $E$  и  $G$  для стали 3 и стали марки IX18N9T, а также  $\sigma/\epsilon$  и  $\tau/\gamma$  после их пластического деформирования. Опыты проведены на испытательной установке, описанной в [10]. При освещении опытных данных, полученных на этой установке, ни в одной из известных нам публикаций, вопрос о независимости действия осевой растягивающей силы  $P$  и скручивающего момента  $M$  не поднимался. Вопросы, касающиеся погрешностей измерения толщины стенки испытательных образцов и их разностепенности не рассматривались.

Приложение к образцу силы  $P$  вызовет опускание диска, через который ему передается момент  $M$ . Нити, соединенные с диском, перестанут располагаться в горизонтальной плоскости. Их натяжение уменьшит  $P$  и  $M$ . Это уменьшение будет зависеть от величины опускания диска. Использование для нагружения и разгрузки гирь точного веса, которое почти всегда подчеркивалось, не освобождало от необходимости учета отмеченных неизбежных погрешностей в опытах при растяжении с кручением. Но этот учет не проводился.

Надо было провести ювелирную обработку, чтобы получить из стали 3 образцы с наружным диаметром  $D$ , в точности равным 18 мм, а из нержавеющей стали — 12 мм при толщине стенки  $h$ , в точности равной 1 мм для всех образцов из той и другой стали. Одно это обстоятельство настораживает в части достоверности полученных в [9] результатов испытаний.

Начальные участки кривых деформирования  $\sigma(\varepsilon)$  и  $\tau(\gamma)$  сталей в исходном состоянии и после пластического деформирования не были построены.  $E$  и  $G$ ,  $\sigma/\varepsilon$  и  $\tau/\gamma$  определялись по наклонам прямых, проходящих через точки с ординатами  $\sigma = 9,81$  МПа и 34,3 или 58,9 МПа и через точки с ординатами  $\tau = 0$  (если поддоны были уравновешены противовесами) и 39,2 или 49,1 МПа. Этим ординатам соответствовали малые деформации порядка 0,02% для  $\varepsilon$  и 0,05% для  $\gamma$ . Измерение малых величин, как известно, сопровождается большими относительными погрешностями. Оценки последних в [9] отсутствуют; приведены лишь численные значения модулей и наклонов без указания приращений напряжений и соответствующих им приращений деформаций, т. е. цифры, ничем не подкрепленные.

В [11] приведены кривые чистого кручения образцов из стали IX18N9T. Начальные линейные участки имеют наклоны около 64 и 65 ГПа. Согласно [9] для этой стали  $G = 79,5$  ГПа. Разница в модулях достигает порядка 20% по отношению к наибольшему значению.

После деформирования образца до  $\gamma = 2,16\%$  он был разгружен. На кривой разгрузки (фиг. 4) семь верхних точек лежат на прямой, наклон которой составляет около 68 ГПа. Он более чем на шесть процентов превышает начальный модуль сдвига.

Приведенные данные свидетельствуют о их недостоверности. Если к этому добавить некорректность определения  $E$ ,  $G$ ,  $\sigma/\varepsilon$  и  $\tau/\gamma$ , то приходим к заключению, что полученное в [9] малое влияние пластических деформаций на  $\sigma/\varepsilon$  и  $\tau/\gamma$  лишено надежных обоснований.

Рассмотрим результаты определения границ текучести (кривых нейтрального нагружения), полученные в [11–13]. Они неизбежно связаны с изменчивостью упругих свойств металлов вследствие их пластического деформирования.

Использованная установка предназначена для испытания материалов на ползучесть в условиях растяжения с кручением. На этой установке можно точно задавать лишь конечные значения  $\sigma$  и  $\tau$ , если для каждого образца надежно определять площадь поперечного сечения  $F$  и полярный момент сопротивления  $W_p$ . Как отмечено выше, точность в определении  $F$  и  $W_p$  индивидуальных образцов была сомнительной.

По достижении заданного уровня  $\sigma$  или  $\tau$  следовало сразу же полностью разгрузить образец, измерить  $D$  и  $h$  и вновь нагрузить вдоль лучей в координатах  $\sigma$ – $\tau$  с тем, чтобы определить новые значения  $\sigma_s$  и  $\tau_s$  по любому допуску. Так надлежало поступать, чтобы избежать ползучести металлов при комнатной температуре за пределами упругости.

В [11–13] избран другой путь — в партии образцов задавалась фиксированная деформация. Но на использованной установке достичь этого в принципе невозможно вследствие неоднородности материала образцов и ползучести. Выдержки разной продолжительности после полной нагрузки усугубляли положение. Перед частичной разгрузкой образцы одной и той же партии приобретали разные пластические деформации, отличные от задаваемых.

В [11–13] принята неизменяемость упругих свойств металлов и линейный закон разгрузки после их пластического деформирования. Как показано в [5], разгрузка пластически деформированного металла следует нелинейному закону, который для стали можно надежно аппроксимировать двузвенной ломаной, а для магниевого сплава МА2 — трехзвенной ломаной. Наклоны верхних звеньев ломаных мало отличаются от модулей упругости, а нижних значительно.

При малых допусках на остаточную деформацию фиксировался сход с одного звена на другой. В период разгрузки это принималось за новый предел текучести в направлении первоначального нагружения. Только этим следует объяснить то, что начало координат не лежит в области, ограниченной кривой текучести.

Взамен приведенного объяснения в [13] читаем: «Как видно из рисунков, границы упругого состояния, определенные по минимальному допуску 0,0005%, полностью располагаются в области положительных значений  $\sigma_x$ . Точки, находящиеся слева от максимума кривых, отвечают интересному явлению возникновения пластических деформаций сжатия (не исчезающих с течением времени) при наличии еще достаточно больших растягивающих напряжений в материале». Такое объяснение назвать обоснованным нельзя.

С уменьшением  $\sigma$  образец, естественно, укорачивался, но деформация все время представляла его удлинение. Откуда же взялась пластическая деформация сжатия?

В рассматриваемых публикациях [9–13] материал в исходном состоянии принимался изотропным. Лишь в [12] сделана попытка проверки начальной изотропии трубок стали 10, имевшей внешний диаметр 12 мм и толщину стенки 0,5 мм (без десятых и сотых долей мм). Трубки поперек разрезались на кольца, которые в

свою очередь разрезались по образующей и выпрямлялись. Полоски длиной порядка 37 мм вместе с трубками отжигались. После этого те и другие были испытаны на растяжение. Машина, на которой произведены испытания и приборы, измерившие деформации, не указаны. Не приведены даже численные значения пределов текучести полосок и трубок. Поэтому вывод о том, что образцы обладали хорошей степенью начальной изотропии, выглядит голословным.

Описанный способ проверки начальной изотропии нельзя признать правильным. К тому же в [12] испытаны отрезки холоднотянутых трубок, не подвергавшихся отжигу.

В отличие от [11–13] в [1–5] измерялись диаметр и толщина стенки образцов с точностью 0,01 мм. Образцы, имевшие разностенность, к испытаниям не допускались. Степень начальной изотропии проверялась надежным методом.

Кривые разгрузки пластически деформированных металлов отражают их реальные свойства. Они говорят, что линейный закон разгрузки с начальными модулями упругости неверен. Они позволяют на любой стадии разгрузки надежно определять деформации, равные конечным деформациям за вычетом восстановленных за счет снятия нагрузки до рассматриваемого уровня.

Рассматриваемые кривые связывают убывающие напряжения одного знака с соответствующими им деформациями того же знака. Применять к ним те же подходы, что и к кривым нагружения, как это сделано в [13], нельзя. Это неизбежно приведет к абсурду – появлению деформаций сжатия при действии растягивающих напряжений. Аналогичный абсурдный результат получен и в [14].

Определение границы текучести нужно для обоснованного выбора пластического потенциала, через который в теории течения выражается приращение тензора пластических деформаций. Но в этой теории реологические факторы не учитываются. Поэтому границы должны определяться в условиях, исключающих появление ползучести металлов при комнатной температуре за пределами упругости. Этому требованию не отвечают методы, использованные в [11–13].

Таким образом, пластические деформации металлов существенно изменяют их упругие свойства. Кривые нейтрального нагружения следует определять методом полных разгрузок и последующих нагрузок при их пропорциональном изменении. В этом методе исключается ползучесть металлов и автоматически учитывается изменяемость упругих свойств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А. М. Прочность и пластичность сплава Д16Т при сложном напряженном состоянии. Изв. АН СССР. ОТН. 1956. № 6. С. 61–70.
2. Жуков А. М. Пластические свойства и разрушение стали при двухосном напряженном состоянии. Инж. сб. 1954. Т. 20. С. 37–48.
3. Жуков А. М. Некоторые особенности кривой нейтрального нагружения. Изв. АН СССР. ОТН. 1958. № 8. С. 32–40.
4. Жуков А. М. Пластические деформации стали при сложном нагружении. Изв. АН СССР. ОТН. 1954. № 11. С. 53–61.
5. Жуков А. М. Поведение металлов при разгрузке и повторной нагрузке. Инж. журн. 1961. Т. 1. Вып. 1. С. 124–133.
6. Naghdi P. M., Rowley J. C. An experimental of biaxial stress-strain relations in plasticity. J. Mech. Phys. Solids, 1954, v. 3. № 1. P. 63–80.
7. Naghdi P. M., Essenburg F., Koff W. An experimental study of initial and subsequent yield surfaces in plasticity. J. App. Mech. 1958, v. 25, № 2. P. 201–209.
8. Жуков А. М. Упругие свойства пластически деформированного металла и сложное нагружение. Инж. сб. 1960. Т. 30. С. 3–16.
9. Шишмарев О. А., Кузьмин Е. Я. О зависимости упругих постоянных металла от пластических деформаций. Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение. 1961. № 3. С. 167–169.
10. Яги Ю. И., Шишмарев О. А. Исследование пластического деформирования при одновременном растяжении и кручении тонкостенных трубчатых образцов металла. Завод. лаб. 1958. Т. 24. № 10. С. 1243–1245.
11. Шишмарев О. А. Изучение участка границы текучести, противоположного точке нагружения. Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение. 1962. № 4. С. 159–164.
12. Шишмарев О. А. Влияние вида девиатора напряжений на пластическое деформирование стали. Инж. журн. МГТ. 1966. № 5. С. 112–118.
13. Яги Ю. И., Шишмарев О. А. Некоторые результаты исследования границ упругого состояния пластически растянутых образцов никеля. Докл. АН СССР. 1958. Т. 119. № 1. С. 46–48.