

УДК 539.372

© 1999 г. А.М. ЖУКОВ

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ С РЕЗКИМ ПОВОРОТОМ ОСЕЙ ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЙ

Экспериментально исследуется влияние истории сложного нагружения материала на изменение его модулей упругости и так называемых догрузочных модулей (наклонов начальных линейных участков на кривых догрузки после предварительного простого нагружения). Приводятся сведения о программах и методике обработки первичных данных экспериментов, выполненных на тонкостенных трубчатых стальных образцах, нагружаемых осевой (растягивающей) силой и крутящим моментом.

В [1] приведены опытные данные, полученные на шести трубчатых образцах из малоуглеродистой стали, испытанных следующим образом: каждый образец был растянут до напряжения  $\sigma_k$ , большего предела текучести  $G_s$ , и при  $\sigma_k = \text{const}$  закручен. В результате для каждого образца были получены кривые догрузки  $\tau(\gamma)$ . Оказалось, что все кривые догрузки имеют начальные линейные участки, наклоны которых  $G_p$  много меньше упругого модуля сдвига  $G_0$ . Эти наклоны были определены по трем теориям пластичности: теории малых упругопластических деформаций, теории течения и теории скольжения. Расхождения теорий с опытом получились весьма большими.

При последующем изложении приняты обозначения:  $n$  – число измерений,  $\sigma_{n-1}$  – среднее квадратическое отклонение,  $\nu$  – коэффициент вариации,  $\delta$  – максимальное отклонение от среднего значения измеренной величины,  $E_0$  и  $G_0$  – модули упругости металла,  $\sigma_k$  и  $\tau_k$  – напряжения, при которых произведены догрузки образцов,  $E_p$  и  $G_p$  – наклоны начальных линейных участков кривых догрузок пластически деформированных металлов. Доверительная вероятность принята равной 0,95.

По описанной в [1] методике был испытан один трубчатый образец из стали ЗОХГСА в отожженном состоянии. Он имел предел пропорциональности  $\sigma_p = 539,5$  МПа и предел текучести  $\sigma_s$  по допуску 0,1% остаточного относительного удлинения  $\sigma_s = 637,7$  МПа и испытан при шести  $\sigma_k < \sigma_p$  и при одном  $\sigma_k > \sigma_s$ . В последнем случае предел пропорциональности на кривой догрузки  $\tau(\gamma)$  не был превзойден. Затем произведено ступенчатое уменьшение  $\sigma_k$  с последующим небольшим закручиванием образца на каждой ступени [2].

Наклоны начальных линейных участков кривых догрузки в [2] были определены по графикам. Здесь же они подсчитаны по способу наименьших квадратов. Максимальное различие в наклонах  $G_0$  составляет 5,1% и приходится на случай  $\sigma_k = 292,1$  МПа, а наибольшее различие в наклонах  $G_p$  составляет 2,3% и соответствует истинному напряжению  $\bar{\sigma}_k = 506,0$  МПа, которое определено по формуле  $\bar{\sigma}_k = \sigma_k / (1 - 2\varepsilon_r)$ .

Результаты уточненной обработки опытных данных приведены в табл. 1, в которой приняты обозначения:  $\varepsilon_1 = (G_p - G_0) / G_0$ ,  $\Delta\varepsilon$  – относительное удлинение образца за период догрузки;  $\bar{G}_p$  – наклон, учитывающий изменение полярного момента сопротив-

Таблица 1

$\sigma_k$ , МПа	0	98,7	197,9	297,2	345,8	494,7
$G_0$ , ГПа	72,47	72,28	69,32	68,78	71,92	72,70
$\delta_1$ , %		-0,26	-3,9	-4,7	-0,06	0,32
$\Delta\varepsilon$ , %	0	0	0	0	0	0
$\bar{\sigma}_k$ , МПа	654,1	499,0	292,1	288,5	144,1	0
$G_p$ , ГПа	36,70	66,14	69,22	70,57	72,18	73,24
$\delta_2$ , %	-49,4	-8,3	-4,1	-2,2	0,04	1,5
$\Delta\varepsilon$ , %	0,303	0,303	0,303	0,303	0,303	0,303
$\bar{G}_p$ , ГПа	37,75	67,90	70,28	72,78	74,57	75,72
$\delta_3$ , %	-47,9	-6,3	-3,0	0,4	2,9	4,5

ления и измерительной базы прибора (определен по формуле  $\bar{G}_p = G_p(1 + \varepsilon)/(1 - 3\varepsilon_r)$ );  $\delta_3 = (\bar{G}_p - G_0)/G_0$ .

Радиальная деформация  $\varepsilon_r$  вычислялась по известной формуле  $\varepsilon_r = \mu\sigma/E + 0,5(\varepsilon - \sigma/E)$ . Влияние пластической деформации на коэффициент Пуассона  $\mu$  и модуль упругости  $E$  не учтено из-за отсутствия необходимых опытных данных.

Статистическая обработка данных второй строки табл. 1 дала  $G_0 = 71,25 \pm 1,81$  ГПа ( $n = 6$ ,  $\nu = 2,4\%$  и  $\delta = 3,47\%$ ). Малые значения  $\nu$  и  $\delta$  свидетельствуют о приемлемой воспроизводимости результатов измерений  $G_0$  и об отсутствии влияния осевой силы  $P$  на действие крутящего момента  $M$  (соблюден принцип независимости действий  $P$  и  $M$ ). Четвертая строка, дополнительно подтверждает то, что в исходном состоянии сталь обладала изотропными свойствами. В противном случае  $\Delta\varepsilon$  не было бы равно нулю.

В разбираемых опытах при закручивании образца поддерживалось неизменным растягивающее усилие  $P$ . Пока  $\sigma_k$  было меньше  $\sigma_p$  условное напряжение  $\sigma_k$  практически не отличалось от  $\bar{\sigma}_k$ . После того как  $\sigma_k$  стало больше  $\sigma_s$ , появилось различие между  $\sigma_k$  и  $\bar{\sigma}_k$ .

На последней ступени нагружения закручивание образца произведено при  $P = 90,25$  кН, которому соответствовало  $\bar{\sigma}_k = 654,1$  МПа, и  $\varepsilon = 1,02\%$ . В конце догрузки ( $\tau = 46,4$  МПа) образец удлинился на  $\Delta\varepsilon = 0,303\%$ , а  $\bar{\sigma}_k$  стало равным 656,1 МПа. Таким образом  $\bar{\sigma}_k$  увеличилось на 2 МПа.

Превышение  $\sigma_k$  над  $\sigma_s$  всего на 1,7% имело результатом уменьшение  $G_p$  почти вдвое по сравнению с  $G_0$ . Удлинение образца  $\Delta\varepsilon$  в период его догрузки моментом  $M$  вызывалось ползучестью стали за пределами упругости и увеличением напряжения  $\bar{\sigma}$ ; определение вклада каждого из двух факторов в  $\Delta\varepsilon$  пока невозможно. Требуется дополнительные опытные данные.

На стадии разгрузки образца обнаружена весьма интересная закономерность: с уменьшением  $\bar{\sigma}_k$  увеличивалось  $G_p$  и при  $\bar{\sigma}_k = 0$   $G_p$  стало на 1,5% больше  $G_0$ . Произошло не только восстановление упругого модуля сдвига, но и его небольшое увеличение.

В [3] приведены опытные данные, полученные на Ст. 45, о влиянии пластической деформации и последующего естественного старения на  $E$ ,  $\sigma_p$  и  $\sigma_s$ . При повторном растяжении образцов  $E$  увеличилось на 3,5% по отношению к первоначальному  $E$ , а  $\sigma_p$  и  $\sigma_s$  даже стали больше  $\sigma_k$ , до которого были нагружены образцы.

В первом случае только за счет деформирования образца при его ступенчатой разгрузке произошло восстановление и даже превышение упругого модуля сдвига на 4,5%. Во втором же случае только за счет естественного старения произошло восстановление и даже превышение модуля Юнга при повторном растяжении. Процессы разные, а результат их качественно одинаков.

Таблица 2

№	$G_0$ , ГПа	$\bar{\sigma}_k$ , МПа	$\epsilon_k$ , %	$\bar{G}_p$ , ГПа	$\Delta\epsilon$ , %	$\frac{\bar{G}_p - G_0}{G_0}$	$\tau'_p$ , МПа	$\gamma'_p$ , %
9	73,2	687,7	3,15	29,6	0,097	-59,6	22,1	0,075
11	64,1	612,6	2,15	32,3	0,272	-49,6	20,0	0,062
12	70,6	634,2	2,16	27,6	0,330	-60,9	44,1	0,16
14	74,4	596,8	1,86	53,4	0,208	-28,5	50,4	0,088

Таблица 3

№	$E_0$ , ГПа	$\tau_k$ , МПа	$\gamma_k$ , %	$E_p$ , ГПа	$\Delta\gamma$ , %	$\frac{E_p - E_0}{E_0}$ , %	$\sigma'_p$ , МПа	$\epsilon'_p$ , %
8	199,1	374,7	3,67	151,3	0,133	-24,0	141,0	0,093
13	196,2	357,1	3,18	115,7	0,162	-41,0	95,0	0,082
14	194,8	357,1	3,08	125,5	0,81	-34,0	114,0	0,091

Известно, что модули упругости любого металла зависят только от температуры. Их изменение в результате пластической деформации, строго говоря, нельзя принять за новые модули упругости, так как естественное старение, например, способно восстановить первоначальные модули упругости.

Четыре трубчатых образца из ст. 20Х2Н4А были испытаны по схеме  $\sigma_k + \tau$  при фиксированных  $\sigma_k > \sigma_s$ , причем  $\sigma_s$  было равно  $394,1 \pm 20,1$  МПа ( $n = 12, \nu = 2,6\%$ ). Результаты этих испытаний представлены в табл. 2, где приняты обозначения:  $N$  – номер образца,  $\epsilon_k$  – деформация, соответствующая  $\sigma_k$ , при которой начала догрузка образца моментом  $M$  и  $\Delta\epsilon$  – приращение относительного удлинения, возникшего за период прохождения начального линейного участка кривой догрузки  $\tau(\gamma)$ .

Образец № 9 сначала был испытан по схеме  $\tau_k + \sigma$ , где  $\tau_k = 168,7$  МПа и  $\gamma_k = 0,0187\%$ . В конце сложного нагружения  $\sigma$  стало равным  $350,9$  МПа, а интенсивность напряжений  $\sigma_i = 389,3$  МПа. На кривой догрузки  $\sigma(\epsilon)$  предел пропорциональности  $\sigma'_p$  оказался равным  $69,3$  МПа при  $\epsilon'_p = 0,039\%$ .

После 13 суток перерыва в испытаниях образец был испытан по схеме  $\sigma_k + \tau$ :  $\sigma_k = 667,1$  МПа, а  $\epsilon_k = 3,15\%$ . В результате первого сложного нагружения  $E$  стало равно  $181,2$  ГПа вместо начального модуля упругости  $E_0 = 199,1$  ГПа. На кривой догрузки  $\tau(\gamma)$  выявился предел пропорциональности  $\tau'_p = 22,1$  МПа, соответствующий  $\gamma'_p = 0,075\%$ .

Пока  $\tau$  было меньше предела пропорциональности  $\tau'_p$  на кривой догрузки увеличивалось только  $\Delta\epsilon$ . После превышения этого  $\tau'_p$  стало интенсивно расти и  $\Delta\epsilon$  и  $\Delta\gamma$ . С ростом  $\Delta\epsilon$  росло истинное растягивающее напряжение. Поэтому выделить какая доля приходится на  $\Delta\bar{\sigma}$  и ползучесть стали за пределами текучести затруднительно.

Три образца были испытаны по схеме  $\tau_k + \sigma$ . Результаты этих испытаний представлены в табл. 3.

Статистическая обработка данных, приведенных в табл. 2, 3 дала:

$\bar{\sigma}_k = 632,8 \pm 63,1$ МПа	( $n = 4,$	$\nu = 5,4\%$	$\delta = 5,7\%$ )
$\epsilon_k = 2,33 \pm 0,86\%$	( $n = 4,$	$\nu = 22,9\%$ ,	$\delta = 33,5\%$ )
$\bar{G}_p = 35,7 \pm 19,0$ ГПа	( $n = 4,$	$\nu = 33,4\%$ ,	$\delta = 49,6\%$ )
$\tau_k = 363,0 \pm 25,2$ МПа	( $n = 3,$	$\nu = 2,8\%$ ,	$\delta = 3,0\%$ )
$\gamma_k = 3,31 \pm 0,78\%$	( $n = 3,$	$\nu = 9,5\%$ ,	$\delta = 10,9\%$ )
$E_p = 124,4 \pm 20,4$ ГПа	( $n = 3,$	$\nu = 6,6\%$ ,	$\delta = 7,0\%$ )

В табл. 2, 3  $\sigma'_p$  и  $\tau'_p$  обозначают пределы пропорциональности кривых догрузок, а  $\epsilon'_p$  и  $\gamma'_p$  — соответствующие им деформации.

При изучении трубчатых образцов (до потери устойчивости) их поперечные размеры не изменяются. Измерение наклона  $E_p$  по кривой догрузки производилось до  $\sigma$  не более 100 МПа, которому соответствовало  $\epsilon = 0,08\%$ . Столь малое удлинение не вызывало необходимости находить истинное значение  $E_p$ ; оно пренебрежимо мало отличалось от условного значения.

По данным этих таблиц получено

$\tau'_p = 34,2 \pm 24,4$ МПа	( $n = 4,$	$\nu = 44,9\%$	и	$\delta = 47,4\%$ )
$\gamma'_p = 0,096 \pm 0,0438\%$	( $n = 4,$	$\nu = 45,6\%$	и	$\delta = 66,7\%$ )
$\sigma'_p = 116,7 \pm 57,5$ МПа	( $n = 3,$	$\nu = 19,8\%$	и	$\delta = 21,7\%$ )
$\epsilon'_p = 0,089 \pm 0,015\%$	( $n = 3,$	$\nu = 6,6\%$	и	$\delta = 6,7\%$ )

Важно отметить, что при испытаниях по схеме  $\sigma_k + \tau$  догрузка образцов сопровождалась ростом  $\gamma$  до  $\tau = \tau'_p$  по закону  $\gamma = \tau/G_p$  и удлинением образцов на  $\Delta\epsilon$ . В испытаниях же по схеме  $\tau_k + \sigma$  образцы до  $\sigma = \sigma'_p$  удлинялись по закону  $\epsilon = \bar{\sigma}/E_p$ , а  $\gamma$  увеличивалось до  $\Delta\gamma$  за счет чистой ползучести, так как  $\tau$  оставалось практически неизменным в силу малости  $\epsilon$  при догрузке в линейной области  $\sigma(\epsilon)$ .

Основные выводы.

1. Обнаружена возможность восстановления упругого модуля сдвига стального трубчатого образца, подвергнутого пластическому деформированию по схеме  $\sigma_k + \tau$ , путем ступенчатой разгрузки и небольшому закручиванию образца на каждой ступени.

2. При сложном нагружении по траектории  $\tau_k + \sigma$  на кривых догрузки  $\sigma(\epsilon)$  появляются начальные линейные участки с наклонами, заметно меньшими модуля Юнга; подтверждено также наличие линейного участка на кривых догрузки  $\tau(\gamma)$  при нагружении образцов из ст. 20Х2Н4А по траектории  $\sigma_k + \tau$ , наклоны которых меньше модуля сдвига.

3. За период догрузки образцов до уровня  $\epsilon \leq \tau'_p$  и  $\sigma \leq \sigma'_p$  возникает увеличение  $\epsilon$  и  $\gamma$  соответственно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А.М. Пластические деформации стали при сложном нагружении // Изв. АН СССР. ОТН. 1954. № 11. С. 53–61.
2. Жуков А.М. Поведение металлов при разгрузке и повторной нагрузке // Инж. ж. 1961. Т. 1. Вып. 1. С. 124–133.
3. Жуков А.М. Свойства стали 45 после пластического деформирования и естественного старения // Изв. АН СССР. МГТ. 1989. № 6. С. 188–191.

Москва

Поступила в редакцию  
4.06.1996