

УДК 539.4

© 1994 г. А. М. ЖУКОВ

УПРУГИЕ И ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОДНОЙ МАРКИ СТАЛИ

Представлены результаты испытаний по определению механических свойств стали 20Х2Н4А в упругой и пластической областях.

Для проведения испытаний было изготовлено 15 трубчатых образцов. Наружный диаметр D и отношение среднего радиуса R к толщине стенки h представлены в табл. 1 для каждого образца N .

По этим данным можно оценить степень неоднородности напряженного состояния в стенке образца, по крайней мере, в упругой области при растяжении в окружном направлении (образцы N 2 и 3). Для опытов на кручение и растяжение с кручением образцы имеют R/h порядка 10, чтобы не было потери устойчивости образцов.

При действии крутящего момента M относительный сдвиг γ измерялся прибором, установленным на внешней поверхности образца, а касательное напряжение τ вычислялось по формуле: $\tau = M/W_p$, где W_p — полярный момент сопротивления, соответствующий наружным волокнам. При таком подходе толщина стенки не вносила дополнительной погрешности в измерения модуля сдвига G .

Для образца N 3, имевшего $R/h = 29,5$, окружное напряжение ϵ_θ на внутренней поверхности в упругой области превышало в 1,07 раза ϵ_θ на наружной поверхности. Таким образом среднее напряжение отличалось от максимального всего на 3,5%. При $\epsilon_\theta = \epsilon_p = 343$ МПа внутреннее давление p было равно 11,8 Па, а в момент разрушения образца p было равно 25,9 МПа. В этот момент ϵ_θ достигло значения 811 МПа. Среднее значение радиального напряжения было мало в сравнении с ϵ_θ и потому не могло сказаться на результатах определения E и особенно других характеристик стали в нелинейной области.

Если за меру упрочнения стали принять величину $(\sigma - \sigma_p)/(\epsilon - \epsilon_p)$, где ϵ_p — деформация, соответствующая σ_p , то она составляет 0,168 E при $\epsilon = 0,5\%$ и 0,103 E при $\epsilon = 1\%$, а при $\epsilon = 4,5\%$, при котором произошло разрушение образца, принятая мера упрочнения равна 0,046 E .

Толщина стенки образца измерялась с точностью 0,01 мм прибором, описанным в [1]. Деформации при сложном напряженном состоянии измерялись прибором, описанным в [2]. Испытания проводились на машине фирмы Шоппер ЦДМУ-30, подвергнутой доводке и небольшой модернизации.

Два образца были испытаны на чистое растяжение в продольном направлении, два образца — в окружном направлении ($R/h = 30,1$ и $29,5$) и два на чистое кручение. Третий образец ($R/h = 29,5$) был испытан в упругой области на сжатие. Модуль упругости при этом получился равным 199,9 ГПа.

При испытаниях образцов 5 и 6 на чистое кручение было замечено, что до предела пропорциональности τ_p образец не удлиняется. Удлинение начинается когда τ становится больше τ_c .

Статистическая обработка опытных данных табл. 1 дала: $E = 195,0 \pm 10,2$ /ГПа ($n = 10$, $v = 2,3\%$), $G = 74,6 \pm 11,0$ ГПа ($n = 11$, $v = 6,5\%$), $\sigma_s = 394,1 \pm 49,2$ МПа ($n = 7$, $v = 5,1$) и $\tau_c = 223,6 \pm 30,9$ МПа ($n = 7$, $v = 5,6\%$). Здесь n означает число измерений, а v — коэффициент вариации. Модули упругости определялись способом наименьших квадратов до напряжений, меньших пределов пропорциональности.

Видно, что значение модуля упругости в окружном направлении лежит внутри доверительного интервала значения модуля упругости, определенного опытами на растяжение в продольном направлении. То же самое можно сказать в отношении E и σ_s , определенных на сплошных образцах.

Таблица 1

<i>N</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>R/h</i>	<i>E</i>	<i>G</i>	σ_s	τ_s	σ_b	ε_b
1	30,95	1,48	9,96	190,6	79,5	382,6	—	765,2	7,2
2	30,00	0,49	30,1	184,4	—	397,3	—	824,0	5,4
3	30,03	0,50	29,5	188,4	—	431,6	—	859,4	4,5
4	31,01	1,50	9,84	194,2	—	405,1	—	850,5	14,5
5	31,00	1,50	9,83	—	71,6	—	215,8	—	—
6	30,94	1,49	9,88	—	65,9	—	215,8	—	—
7	31,02	1,49	9,91	195,2	74,6	—	215,8	—	—
8	31,01	1,50	9,84	197,4	71,0	—	220,7	—	—
9	31,18	1,50	9,89	199,1	82,2	—	220,7	—	—
11	31,02	1,50	9,84	195,2	70,6	392,4	—	—	—
12	31,00	1,48	9,98	202,1	79,4	372,8	—	—	—
13	31,03	1,48	9,98	196,2	78,5	—	225,6	—	—
14	31,25	1,62	9,15	185,5	74,4	376,7	—	—	—
15	31,02	1,48	9,98	194,8	73,2	—	251,1	—	—

Таблица 2

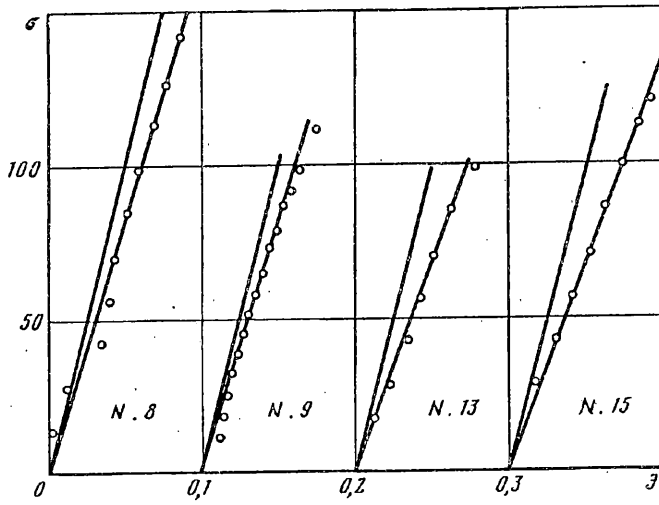
<i>N</i>	σ_k	ε_k	τ_k	γ_k	<i>E</i>	<i>G</i>	E_p	G_p	$\Delta E/E$	$\Delta G/G$
8	—	—	374,7	3,77	197,4	—	151,3	—	23,4	—
9	—	—	168,7	0,13	199,1	—	152,6	—	23,4	—
	667,1	3,25	—	—	182,0	76,5	—	29,1	—	62,0
11	600,4	2,28	—	—	—	70,6	—	42,3	—	28,3
12	627,8	2,16	—	—	—	79,4	—	53,4	—	32,7
13	—	—	357,1	3,18	196,2	—	115,7	—	41,0	—
14	586,6	1,86	—	—	—	74,4	—	53,4	—	28,2
15	—	—	367,1	3,08	194,8	—	128,5	—	34,0	—

Следует отметить, что $\sqrt{3}\tau_s = 386,8$ МПа отличается от σ_s всего на 7,3 МПа или на 1,8%. Отсюда можно заключить, что исследуемая сталь подчиняется критерию текучести Мизеса.

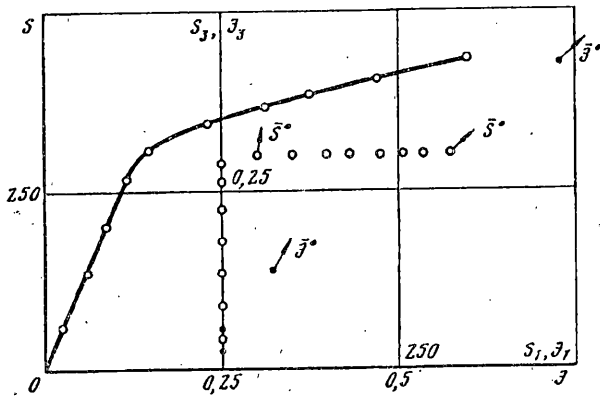
Не лишено смысла заметить, что коэффициент Пуассона μ , вычисленный по формуле $E/(2G) - 1$, равен 0,307, а модуль объемной упругости, подсчитанный по выражению $E/[3(1 - 2\mu)]$ равен 168,4 ГПа. Последний использован для определения октаэдрического относительного удлинения ε_0 , входящего в зависимости теории малых упругопластических деформаций. В одном случае произведено сравнение σ_{ij} и ε_{ij} , определенных по этой теории, с полученными из опыта.

Трубчатый образец *N* 10 оказался дефектным и испытаниям не подвергался. Образец же 7 был испытан на растяжение при постоянном $\tau > \tau_s$. Из-за неправильной установки тензометра на образец испытание было испорчено. Тензомер не фиксировал удлинение образца после приложения к нему растягивающего усилия.

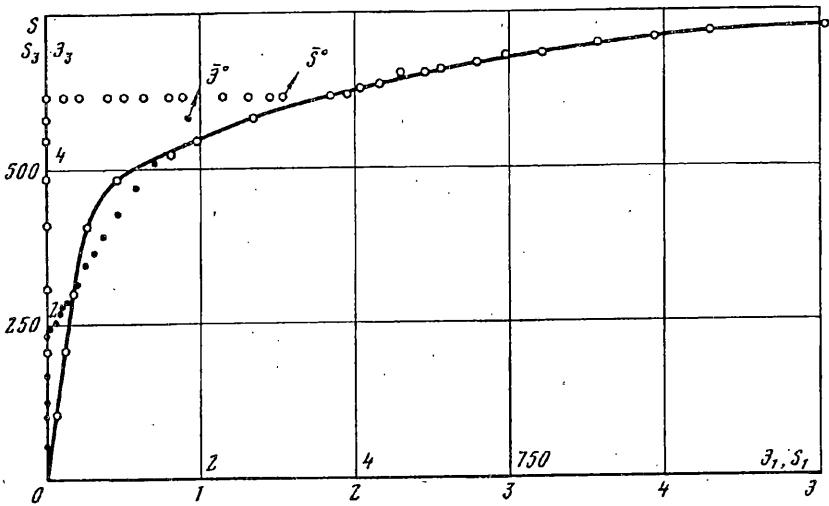
На малоуглеродистой стали [3] и хромоникелевой стали [4] было обнаружено, что при кручении трубчатого образца, подвергнутого действию постоянного напряжения $\sigma_k > \sigma_s$, на кривой догрузки $\tau(\gamma)$ имеется начальный линейный участок, наклон которого заметно меньше упругого модуля сдвига. Таким эффектом обладает и исследуемая сталь. Это подтверждают данные табл. 2, где σ_k и τ_k — напряжения в МПа, при которых произведен ортогональный излом траектории нагружения, ε_k и γ_k — соответствующие им деформации в процентах, а E_p и G_p — наклоны начальных линейных участков кривых догрузок, выраженные в ГПа. Последние и модули упругости определены способом



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

$\gamma^* \cdot 10^4$	τ^*	γ	τ	$\epsilon^* \cdot 10^4$	σ^*	ϵ	σ
27,0	168,7	29,4	155,0	10,04	141,8	8,4	162,8
30,8	—»—	33,5	155,0	14,1	180,5	13,2	191,3
40,0	—»—	42,5	158,9	20,4	223,7	20,3	224,6
46,0	—»—	48,7	160,0	26,3	256,0	26,4	256,0
55,3	—»—	58,1	160,9	34,3	285,5	34,6	283,5
74,3	—»—	75,2	166,8	48,2	321,8	50,0	313,9

наименьших квадратов. Лишь при определении G_p во втором нагружении образца $N 9$ использовано четыре опытных точки. В остальных случаях n всегда было много больше.

На фиг. 1 изображены начальные участки кривых догрузки образцов, которые были пластически деформированы кручением и при постоянном $\tau_k > \tau_s$ растянуты. До 100 и более МПа начальные участки можно считать линейными. Там проведены прямые без опытных точек, соответствующие модулям упругости образцов в исходном состоянии. Различие наклонов прямых с точками и без них наглядно свидетельствует, что $E_p < E$.

Появление начальных линейных участков на кривых догрузки при сложном нагружении по схемам $\sigma_k + \tau$ и $\tau_k + \sigma$, видимо, обусловлено резким поворотом осей тензора напряжений, изменявшим площадки главных сдвигов в материале.

Из табл. 2 видно, что образец $N 9$ дважды подвергался сложному нагружению. При первом нагружении интенсивность напряжений σ_1 была доведена до 435 МПа, а интенсивность деформаций достигла 0,65%. Стали сообщена пластическая деформация и она приобрела деформационную анизотропию. О последнем свидетельствует уменьшение E с 199,1 до 182,0 ГПа. Чтобы свести к минимуму приобретенную анизотропию при втором нагружении, осуществленном через 13 суток после 1-го нагружения, σ_k и ϵ_k доведены до значений 667,1 МПа и 3,25% соответственно. Так как ϵ_k не мало, то при вычислении ϵ , γ , σ и τ учтено изменение измерительной базы тензометров и поперечного сечения образца. Отмеченный учет выполнен в результатах всех проведенных испытаний.

В качестве компонент вектора деформаций использованы: $\mathcal{E}_1 = \frac{2}{3} [\epsilon_z - \frac{1}{2}(\epsilon_x + \epsilon_y)]$ и $\mathcal{E}_3 = \gamma_{20}/\sqrt{3}$, а компонент вектора напряжений: $S_1 = \sigma_z$ и $S_3 = \sqrt{3} \tau_{20}$.

Если учесть упругие составляющие деформаций, то \mathcal{E}_1 примет выражение

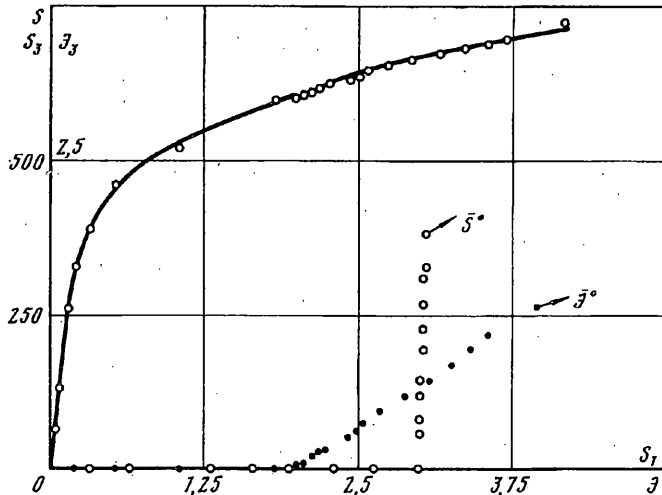
$$\mathcal{E}_1 = \epsilon_z - \frac{1}{3}(1 - 2\mu) \sigma_z/E.$$

При таких компонентах их модули равны соответственно ϵ_1 и σ_1 . Как и ранее, индексы у ϵ_2 , σ_2 , τ_{20} и γ_{20} для простоты вновь опустим.

На фиг. 2 представлены траектория нагружения (светлые точки) и траектория деформирования (темные точки) первого нагружения образца $N 9$. Для начальных и конечных точек после излома траектории нагружения указаны направления соответственно векторов S° и \mathcal{E}° . Угол между этими векторами для начальных точек равен 5,2°, а для конечных точек 1,96°. Последнее говорит о том, что вектора S° и \mathcal{E}° практически параллельны и возможно использовать теорию малых упруго-пластических деформаций для предсказания σ_{ij} по опытным данным ϵ_{ij} и наоборот.

Вычисления по этой теории были выполнены для всех шести ступеней сложного нагружения. Октаэдрическое относительное удлинение ϵ_0 при этом было определено по закону Гука для объемной деформации, который подтвержден экспериментами [5, 6], т. е. по формуле $\epsilon_0 = \epsilon_0/(3K)$, где ϵ_0 — октаэдрическое нормальное напряжение. Результаты вычисления сведены в табл. 3 (значения без звездочек). Там же приведены опытные значения σ_{ij}^* и ϵ_{ij}^* . Наибольшие расхождения (до 17%) между теоретическими и опытными значениями σ_{ij} и ϵ_{ij} приходятся на конец первой ступени сложного нагружения. В конце же сложного нагружения это расхождение не превышает 3,7% для ϵ . Расхождение в σ составляет 2,4%, а в τ и γ всего 1,2%.

В задачу проведенных исследований не входила проверка принципа запаздывания векторных и скалярных свойств стали. Поэтому опыты заканчивались получением небольших участков кривых догрузки. Исключение составляют испытания образца $N 13$, который был заркучен до $S_3 = 618$ МПа



Фиг. 4

и $\varepsilon_3 = 1,84\%$ и затем растянут при $S_3 = \text{const}$, а также образца $N 14$, который был нагружен до $S_1 = 597,4$ МПа ($\varepsilon_1 = 1,83\%$) и при $S_1 = \text{const}$ закручен.

Обозначим через β_1 угол между направлениями векторов S и ε ; а через β_2 угол между направлениями векторов S и $d\varepsilon/d\varepsilon$. Если $\beta_1 = 0$ или мало, то как показано выше, можно пользоваться теорией малых упругопластических деформаций, если же β_1 не мало, а β_2 мало, то можно пользоваться теорией течения вида $S/S = d\varepsilon/d\varepsilon$.

В литературе по пластичности обычно принято проверять принцип запаздывания векторных свойств по изменению β_2 в зависимости от длины дуги траектории деформирования после излома. Обоснованных рекомендаций о значении β_2 , которое определяет длину следа запаздывания не установлено. В [7], например, рекомендуется $\beta_2 = 6^\circ$. Но где гарантия, что написанная выше теория течения будет работать?

В скалярной форме эту теорию можно записать так:

$$S_1 = S d\varepsilon_1/d\varepsilon, S_3 = S d\varepsilon_3/d\varepsilon, d\varepsilon_1 = d\varepsilon S_1/S, d\varepsilon_3 = d\varepsilon S_3/S.$$

Нагружение в опытах осуществлялось ступенями, но без выдержек, чтобы исключить ползучесть стали. На каждой ступени изменения σ и τ производилось измерение ε и γ .

Надежное измерение наклона касательной к опытной траектории деформирования затруднительно. Этот наклон заменялся наклоном секущей на соответствующей ступени нагружения. Таким образом β_2 принимался равным углу между векторами $\Delta\varepsilon/\Delta\varepsilon$ и S . По журналу испытаний β_2 легко вычисляется. После того, как β_2 становится малым представляется возможным найти теоретические значения S и сравнить теоретические и опытные результаты.

На фиг. 3 представлены: траектория нагружения, траектория деформирования и кривая $S(\varepsilon)$ образца 13. Для предпоследней ступени нагружения $\beta_2 = 7,1^\circ$. Наибольшее расхождение теории течения с опытом составляет $10,8\%$ и приходится на S_1 . Для последней ступени нагружения $\beta_2 = 2,6^\circ$. Наибольшее расхождение теории с опытом составляет $1,3\%$ и приходится на $\Delta\varepsilon_1$.

На фиг. 4 представлены аналогичные кривые образца 14. Для последней ступени нагружения $\beta_1 = 13,7^\circ$ и $\beta_2 = 2,8^\circ$. Наибольшее расхождение теории течения с опытом здесь составляет $5,5\%$ и приходится на S_3 .

Длина следа запаздывания векторных свойств λ у образца 13 составила около $3,4\%$ ($\lambda \cong 10\varepsilon_s$, ε_s — деформация, соответствующая σ_s), а у образца 14 приблизительно $2,4\%$ ($\lambda \cong 7\varepsilon_s$).

На кривых упрочнения $S(\varepsilon)$ крест означает начало ортогонального нагружения. При задании траектории нагружения в начале сложного нагружения наблюдается небольшое уменьшение упрочнения стали, а затем оно становится таким же, как и при простом нагружении. На основании этого можно принять, что для исследуемой стали ортогональное нагружение оказывает слабое влияние на кривую упрочнения $S(\varepsilon)$.

На начальных этапах ортогонального нагружения доминирующее влияние оказывает ϵ_k или ζ_k , под действием которых за счет ползучести растут соответствующие деформации. Истинные напряжения и здесь продолжают возрастать.

В случае задания ортогональных деформирований возможно падение ϵ_k или ζ_k после излома траектории деформирования за счет релаксации. Но чистой разгрузки (одновременного убывания напряжений и деформаций) не возникает. Поэтому «нырок» носит локальный характер. За ним кривая упрочнения должна совпадать с кривой $S(\epsilon)$, полученной при простом нагружении.

Иное дело, когда излом траекторий совершается при углах, больших 90° С. Тут возможно появление чистой разгрузки, которая будет иметь результатом существенное изменение кривой $S(\epsilon)$. Это было предметом рассмотрения в [8].

Таким образом, длину следа запаздывания векторных свойств целесообразно определять по степени совпадения теории течения $S/S = d\epsilon/d\epsilon$ с опытом. На кривой догрузки $\epsilon(\epsilon)$ пластически закрученного образца имеется начальный линейный участок с наклоном, меньшим упругого модуля E .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А. М. Прочность и пластичность сплава Д16Т при сложном напряженном состоянии//Изв. АН СССР. ОТН. 1954. № 6. С. 61—70.
2. Жуков А. М. Пластические свойства и разрушение стали при двухосном напряженном состоянии//Инж. сб. 1954. Т. 20. С. 39—48.
3. Жуков А. М. Пластические деформации стали при сложном нагружении//Изв. АН СССР. ОТН. 1954. № 3. С. 53—64.
4. Жуков А. М. Некоторые особенности поведения металлов при упругопластическом деформировании//Вопросы теории пластичности. 1961. С. 30—57.
5. Жуков А. М. О коэффициенте Пуассона в пластической области//Изв. АН СССР. ОТН. 1954. № 12. С. 86—91.
6. Shelton A., Ford H. The contraction ratio for workhardening materials//J. Iron Steel Inst. 1956. V. 182. No. 2. P. 160—168.
7. Зубчианинов В. Г. Основы теории упругости и пластичности. М.: Наука, 1990. 368 с.
8. Жуков А. М. О свойствах запаздывания в общей теории пластичности//Изв. АН СССР. МТТ. 1992. № 5. С. 110—119.

Москва

Поступила в редакцию
23.VII.1991