

9. Мерсавер Я. А., Пиж Ю. П. Эхо-сигнал конечного сферического импульса от заполненной жидкостью сферической оболочки // ПММ. 1976. Т. 40, вып. № 4. С. 648–654.
10. Goodman R. R., Stern R. Reflection and transmission of sound by elastic spherical shells // J. Acoust. Soc. Amer. 1962. V. 34. N 3. P. 338–344.
11. Uginčius P., Überall H. Creeping-wave analysis of acoustic scattering by elastic cylindrical shells // J. Acoust. Soc. Amer. 1968. V. 43. N 5. P. 1025–1035.
12. Gaunard G. C., Werby M. F. Resonance response of submerged, acoustically excited thick and thin shells // J. Acoust. Soc. Amer. 1985. V. 77. N 6. P. 2081–2093.
13. Murphy J. D., George J., Nagl A., Überall H. Isolation of the resonant component in acoustic scattering from fluid-loaded elastic spherical shells // J. Acoust. Soc. Amer. 1979. V. 65. N 2. P. 368–373.
14. Murphy J. D., Breitenbach E. D., Überall H. Resonance scattering of acoustic waves from cylindrical shells // J. Acoust. Soc. Amer. 1978. V. 64. N 2. P. 677–683.

Минск

Поступила в редакцию
2.XII.1987

УДК 539.5

А. М. ЖУРОВ

СВОЙСТВА СТАЛИ 45 ПОСЛЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ

На малоуглеродистой стали и алюминиевом сплаве Д16Т было обнаружено заметное увеличение предела текучести по отношению к конечному напряжению при первоначальном нагружении после их пластического деформирования растяжением и продолжительного естественного старения. Отмечалось также увеличение модуля упругости стали на 5,7% в сравнении с модулем упругости в исходном состоянии [1].

Было выявлено, что чистая разгрузка стали, проведенная сразу же по окончании нагружения до $\sigma_k = 294,3$ МПа, начиналась с напряжения, равного $0,94\sigma_k$. За период убывания напряжения до этого уровня удлинение образца росло. Это означает, что на рассматриваемом этапе реологические факторы преобладали над силовыми. Хорошо известно, что при комнатной температуре металлы, за пределами упругости ползут. Ползучестью можно объяснить запаздывание начала чистой разгрузки [2]. Но это предположение нуждается в опытным подтверждении, которое и было осуществлено в данном исследовании.

Из прутка, маркированного в качестве малоуглеродистой стали, было изготовлено восемь образцов, которые после токарной обработки были подвергнуты шлифовке. Диаметр рабочей части каждого образца был выдержан постоянным по его длине и имел размер около 7 мм; длина рабочей части составляла 105 мм.

Испытания проведены на машине и по методике, использованной в опытах [2]. Методика испытаний изменена лишь тем, что разгрузке предшествовала выдержка при σ_k разной продолжительности t .

Образец 1 первоначально был нагружен до $\sigma_k = 294,3$ МПа. До этого уровня напряжений он деформировался упруго. Повторные нагружения до 304,1 и 327,7 МПа не вызвали пластических деформаций. После этого его испытали на разрывной машине до разрушения. Растягивающее усилие измеряли по шкале 39,2 кН, а деформации прибором МК-3.

В результате последних получены следующие данные: модуль упругости $E = 205,9$ ГПа, предел пропорциональности $\sigma_p = 327$ МПа, предел текучести по допуску $0,1\%$ остаточного относительного удлинения $\sigma_s = 369,5$ МПа, условный предел прочности $\sigma_b = 555,7$ МПа и деформация при разрушении $\epsilon_b = 18,9\%$, вычисленная из условия несжимаемости по остаточному изменению диаметра образца вдали от шейки (на участке однородного деформирования).

Замечено, что изменение диаметра рабочей части образца вдали от шейки было одинаковым. Аналогичное постоянство диаметра рабочей части образца после его пластического деформирования наблюдалось на остальных испытанных образцах. По-видимому, это является следствием шлифовки и отсутствия внецентренности растяжения образцов.

Полученные на образце механические характеристики соответствуют не малоуглеродистой стали, а стали 45 в незакаленном состоянии.

Нагружения рассматриваемого образца на машине TF-2 производили в упругой области. Поэтому значение $E = 204$ ГПа можно сравнивать с $E = 205,9$ ГПа, полученным на разрывной машине; расхождение в модулях составляет всего 0,9%. Это свидетельствует о хорошем совпадении результатов испытаний на двух разных типах машин (силовой и кинематической), которые были использованы в опытах.

Результаты первого нагружения семи образцов до $\sigma_k = 369,3$ МПа представлены в табл. 1, где в первом столбце указаны номера образцов, t в час, ϵ_1 — деформация

Таблица 1

№	E	σ_p	σ_s	t	σ^*	ε_1	ε_2	ε_k	ε''
2	204,0	327,0	369,3	0	22,2	196	196	198,5	175,2
3	201,8	356,9	»	24	21,0	18,1	208,1	208,1	190,2
4	185,3	»	»	4	21,3	174,3	195,4	195,4	171,0
5	199,3	»	»	1	—	28,5	190,2	—	—
6	199,0	»	»	0,167	21,5	20,0	202,3	202,3	179,6
7	203,0	»	»	0,083	21,0	28,6	299	299	276,5
8	203,4	»	»	0,033	21,4	19,1	202,9	202,9	179,2

Таблица 2

№	τ	E^*	σ_p^*	σ_s^*	δ_1	δ_2	δ_3
2	0,05	190,6	183,9	360,5	-6,6	-38,7	-2,4
3	509	233,8	432,2	470,9	15,9	18,5	27,5
4	504	201,5	469,9	478,7	2,0	27,2	29,6
5	371	203,2	»	480,7	2,0	27,2	30,2
6	268	199,4	»	487,6	0,2	»	32,0
7	63	201,4	550,2	569	-0,8	49,0	54,1
8	43	205,6	473,8	480,7	1,1	28,3	30,2

в конце нагружения, ε_2 — деформация в начале разгрузки, ε_k — накопленная деформация и ε'' — деформация после полной разгрузки; все ε умножены на 10^4 .

Отметим, что все испытанные образцы изготовлены практически одновременно. Интервал времени между первым нагружением образцов 2 и 8 составил около полутора лет. Если судить по E , σ_p , σ_s табл. 1, то дата первого нагружения фактически не оказала никакого влияния на результаты испытаний. Отсюда можно заключить, что сталь прутка, из которого изготовлены образцы, была полностью естественно состарена.

Используя принятый в теории вероятностей критерий исключения резко выделяющихся результатов измерений, которые будем называть выбросами, выявлено, что E для образца 4 является выбросом. Исключив его, получим $E=201,7 \pm 2,5$ ГПа и коэффициент вариации $v=1,1\%$. Здесь и далее доверительные интервалы соответствуют вероятности 0,95.

Значение $\sigma_p=352,6 \pm 10,5$ МПа ($v=3,2\%$), а значение σ_s , как видно из табл. 1, одинаково для всех образцов и равно 369,3 МПа.

Скорость разгрузки шести образцов $\sigma^*=21,4 \pm 0,5$ МПа/мин ($v=2,1\%$). Практически можно считать, что она одинакова для всей серии испытанных образцов.

На исследуемой стали обнаружена задержка ползучести при напряжениях, близких к пределу текучести, аналогичная той, которая выявлена на малоуглеродистой стали [3]. Время задержки ползучести на сей раз измерено приближенно. Оно составило 50с для образца 5, 15с для образца 6 и 2с для образца 8.

У образцов 2 и 4 $\varepsilon_1=\varepsilon_2$ и намного превышает упругую деформацию. Ползучесть проявилась, по-видимому, на последней стадии нагружения. Для остальных пяти образцов ε_1 мало отличается от упругой, но за счет ползучести ε_2 сильно возросло.

Образец 2 разгружен сразу же по окончании нагружения. За период разгрузки деформация увеличилась на $2,5 \cdot 10^{-4}$. В остальных случаях разгрузка произведена до прошествия некоторого времени t и увеличения деформации на стадии разгрузки не наблюдалось. Чистая разгрузка рассматриваемого образца началась не с $\sigma_k=369,3$ МПа, а с напряжения, равного 358,3 МПа.

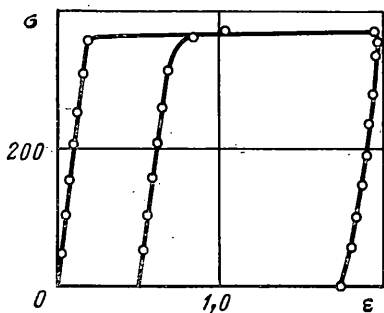
Из изложенного следует, что даже небольшая выдержка (2 мин) образца под нагрузкой, соответствующей σ_k , исключает влияние реологических факторов на кривую разгрузки. Сильные факторы начинают преобладать над реологическими.

Статистический анализ показал, что ε_k для образца 7 является выбросом. По его удалении получено $\varepsilon_k=1,98 \pm 0,06\%$ ($v=2,1\%$).

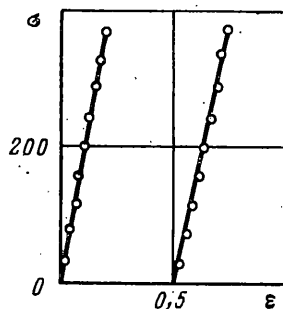
На фиг. 1 представлены кривые растяжения образца 2 при первом (левая кривая) и втором нагружениях (правая кривая). На этих и последующих графиках по оси абсцисс отложена деформация в процентах, а по оси ординат — напряжение в МПа. Там же изображена кривая разгрузки после первого нагружения. Последняя явно следует нелинейному закону.

Начальный линейный участок диаграммы растяжения при повторном нагружении по истечении примерно 70 мин после разгрузки простирается до уровня порядка 150 МПа вместо 327 при первом нагружении. Имело место уменьшение σ_p более, чем в два раза. Предел текучести также уменьшился, став равным 343,4 МПа вместо 369,3.

На фиг. 2 представлены кривые разгрузки образца 3, выдержанного под конечной нагрузкой сутки (левый график), и образца 8, выдержанного 2 мин.



Фиг. 1



Фиг. 2

Опытные точки в первом случае располагаются вблизи прямой, соединяющей точки с ординатами σ_h и $\sigma = 0$. Наклон этой прямой (секущий модуль при разгрузке) равен 187,5 ГПа. Разгрузка другого образца явно нелинейна. Секущий модуль в этом случае равен 155,8 ГПа, что на 23,4% меньше начального модуля упругости этого образца. Различие же в модулях для образца 3 составляет 7,1%.

На малоуглеродистой стали было установлено, что при напряжении меньшем только на 8,4% предела прочности, деформация ползучести практически прекращается за период порядка 48 час [4]. Ограниченной ползучестью обладает и исследуемая сталь. За 24 часа деформация образца 3 увеличилась всего на $2,5 \cdot 10^{-4}$.

Не исключено; что после увеличения времени выдержки под нагрузкой вдвое ползучесть образца совсем прекратилась бы и сталь приобрела бы стабильное состояние. Возможно это имело бы результатом дальнейшее увеличение секущего модуля на стадии разгрузки.

Иначе говоря, имеются некоторые основания предполагать, что после прекращения ползучести происходит восстановление упругих свойств стали. Это предположение, естественно, нуждается в дополнительной опытной проверке.

В табл. 2 приведены результаты повторного растяжения образцов во шпествии τ сут после их пластического растяжения. Повторному растяжению предшествовало измерение измененного диаметра образца и определение по нему площади поперечного сечения F^* . Новые значения прочностных характеристик стали обозначены буквами со звездочками наверху. Относительные изменения их в процентах определены по формулам

$$\delta_1 = (E^* - E)/E, \delta_2 = (\sigma_p^* - \sigma_h)/\sigma_h, \delta_3 = (\sigma_s^* - \sigma_h)/\sigma_h$$

Быше было отмечено, что E для образца 4 является выбросом. В табл. 2 значение E^* для этого образца приведено, но при статистической обработке оно не использовано, как не использовано E этого образца при определении среднего значения и доверительного интервала по результатам первого нагружения. Остальные характеристики его были использованы при статистических обработках результатов повторного нагружения.

В испытаниях образцов стали ЗОХГСА и магниевого сплава МА2 было выявлено, что при повторных нагружениях пластически деформированных металлов, производимых сразу же после разгрузки, наклоны начальных линейных участков кривых растяжения становятся меньше начального модуля упругости. За счет продолжительного отдыха упругие свойства почти полностью восстанавливались [5].

В задаче настоящих исследований входило и выяснение влияния естественного старения на упругие свойства пластически деформированной стали. Поскольку образец 2 фактически старению не подвергался, то при статистической обработке значение E^* для него не учитывалось. Обработка дала $E^* = 208,7 \pm 17,6$ ГПа ($\nu = 6,8\%$). Среднее значение E^* увеличилось на 3,5% по сравнению со средним значением E . Четко выраженной зависимости E^* от продолжительности отдыха, как и на малоуглеродистой стали, не обнаружено.

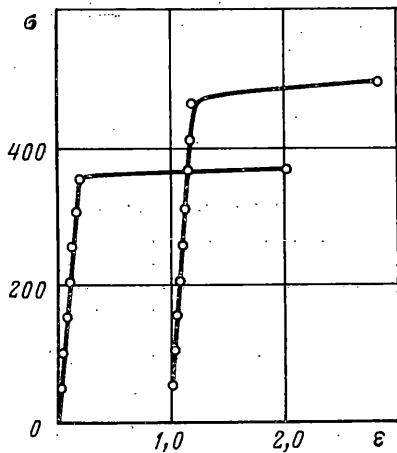
Новый предел пропорциональности σ_p^* стал равен 477,7 \pm 42,3 МПа ($\nu = 8,4\%$). Он увеличился на 29,4% по сравнению с $\sigma_h = 369,3$ МПа и на 35,5% по отношению к σ_p . Новый предел текучести σ_s^* стал равен 479,7 \pm 7,4 МПа ($\nu = 1,2\%$). Он увеличился 29,9% по сравнению с σ_h .

При вычислении среднего значения σ_s^* предел текучести образца 7 не учитывался; он принадлежит к разряду выбросов.

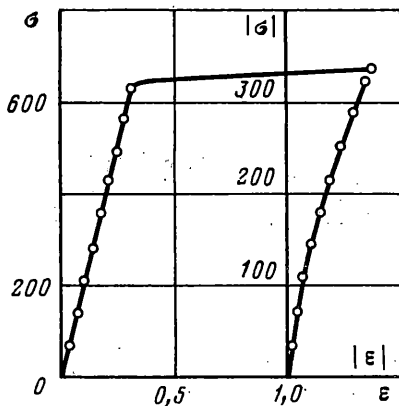
На фиг. 3 показаны кривые деформирования образца 3 при первом нагружении (левый график) и при втором нагружении (правый график). Они наглядно свидетельствуют об упрочнении стали после пластического растяжения и естественного старения. Аналогичное наблюдается и на других образцах после отдыха.

На фиг. 4 представлены начальные участки кривой растяжения (левая кривая) стали ЗОХГСА в нормализованном состоянии и кривой сжатия того же образца после его вытяжки на 3,2% и отдыха в течение 42 сут. Напряжения во втором случае подчитаны с учетом измененной площади поперечного сечения.

При растяжении получено: $E = 209,2$ ГПа, $\sigma_p = 635$ МПа и $\sigma_s = 655$ МПа, а при сжатии $E^* = 166,9$ ГПа, $\sigma_p^* = 127$ МПа и $\sigma_s^* = 283$ МПа. Модуль E^* определен по наклону прямой, проходящей через первые четыре точки.



Фиг. 3



Фиг. 4

Реверсирование нагрузки привело к уменьшению модуля упругости на 20,2%, предела пропорциональности на 80% и предела текучести на 56,8%. Естественное старение даже не восстановило начальных прочностных свойств стали.

Таким образом, повторное нагружение того же знака после продолжительного отдыха повышает все прочностные характеристики стали. Вблизи предела текучести сталь 45 обладает свойством задержки ползучести. Выдержка малой продолжительности (2 мин) при σ_k устраняет возрастание деформации на начальной стадии разгрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А. М. Разгрузка пластически деформированных металлов и последующая нагрузка // Изв. АН СССР. МТТ. 1989. № 2. С. 179–183.
2. Жуков А. М. Разгрузка пластически деформированных металлов при фиксированных скоростях убывания напряжений // Изв. АН СССР. МТТ. 1987. № 3. С. 189–192.
3. Жуков А. М. Задержка ползучести малоуглеродистой стали при комнатной температуре // Пробл. прочности, 1972. № 4. С. 54–58.
4. Жуков А. М. Ползучесть металлов при комнатной температуре после частичной разгрузки // Изв. АН СССР. МТТ. 1984. № 5. С. 181–186.
5. Жуков А. М. Поведение металлов при разгрузке и повторной нагрузке // Инж. ж. 1961. Т. 1. Вып. 1. С. 124–133.

Москва

Поступила в редакцию
24.VIII.1988