

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольденвейзер А. Л., Лидский В. Б., Товстик П. Е. Свободные колебания тонких упругих оболочек. М.: Наука, 1979. 383 с.
2. Кузнецов О. В. Анализ свободных колебаний сопряженных между собой цилиндрических и сферических оболочек.— В кн.: Динамика и колебания механических систем. Иваново: Изд-е Иванов. ун-та, 1982, с. 119—125.
3. Кузнецов О. В. Модели для анализа резонансных колебаний неоднородных оболочечных конструкций.— В кн.: Динамика и вибродиагностика механических систем. Иваново: Изд-е Иванов. ун-та, 1983, с. 77—86.
4. Тамаркин Я. Д. О некоторых общих задачах теории обыкновенных линейных дифференциальных уравнений и о разложении произвольных функций в ряды. Пг.: Тип. М. П. Фроловой, 1917. 308 с.
5. Власов В. З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике.— В кн.: Избр. тр. М.: Изд-во АН СССР, 1962, т. 1, с. 15—430.
6. Кузнецов О. В. Осесимметричные волны в цилиндрах конечной длины.— В кн.: Вопросы математической физики и теории колебаний. Иваново: Изд-е Иванов. энерг. ин-та, 1975, с. 96—102.

Москва

Поступила в редакцию
11.XI.1985.

УДК 539.214:539.374

РАЗГРУЗКА ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ФИКСИРОВАННЫХ СКОРОСТЯХ УБЫВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

ЖУКОВ А. М.

Нелинейное деформирование любого материала сопровождается различием законов нагрузки и разгрузки. В существующих теориях пластичности принимается, что разгрузка пластически деформированного металла подчиняется линейному закону, характеризующемуся начальным модулем упругости. Как показали опыты [1, 2], разгрузка не следует начальному линейному закону, ее характер сложнее. Остаточные деформации, вычисляемые по линейному закону разгрузки, дают расходящиеся с опытом результаты. Значительного расхождения можно избежать, если использовать реальные законы разгрузки. Но для этого их необходимо всесторонне изучить для разных металлов и разных уровней конечных напряжений.

В упомянутых опытах были использованы машины кинематического типа, в которых осуществлялось взаимное принудительное смещение захватов. При испытаниях на них скорость разгрузки оставалась неопределенной. На начальных стадиях разгрузки пластически деформированных сталей было замечено возрастание деформации несмотря на убывание нагрузки, действовавшей на испытательный образец. Последнее обусловлено ползучестью металлов за пределами упругости, которая сравнительно подробно исследована на разных металлах.

Необходимо провести исследования величины уменьшения действующего напряжения, после которого наступает убывание деформации; величины пластической деформации, накапливаемой за этот период; законов чистой разгрузки (одновременного убывания напряжения и деформации); влияние фиксированной скорости убывания нагрузки с разных уровней действующих напряжений. Решению этих вопросов и посвящена публикуемая работа.

Для проведения указанных исследований была переоборудована машина ТГ-2. Одноплечевой силовой рычаг был заменен двухплечевым с призмами на концах, на которые подвешивался с одной стороны пустой бак, а с другой — подвеска. Нагружение испытательного образца осуществлялось наложением на подвеску калиброванных грузов, а разгрузка производилась заливкой воды в бак под постоянным напором через отверстие в круглой пластинке загрузочного крана. Устройство, обеспечивающее постоянный напор воды, описано в [3]. Деформации образцов при нагрузке и разгрузке измерялись прибором МК-3, погрешность которого на прямом и обратном ходе не превышала 0,8%. Погрешность испытательной машины не превышала 0,1%.

Образцы имели длину рабочей части порядка 105 мм и диаметр около 7 мм. Измерение деформаций производилось в средней части образца на базе 50 мм. После монтажа образца и тензомера силовой рычаг машины приводился в горизонтальное положение посредством перемещения по нему в нужном направлении противовеса. Таким путем достигалось уравнивание рычага с пустым баком и подвеской перед каждым испытанием.

Калиброванный груз, положенный на подвеску, вызывал усилие в образце, равное 1962 Н. Наложение четырех грузов создавало в образце напряжение около 206 МПа, которое меньше предела пропорциональности малоуглеродистой стали (сталь 3). Наложение пятого груза вызывало напряжение порядка 256 МПа, большее предела текучести, полученного в результате испытаний на машине ЦД 10/90. Перед наложением шестого груза, вес которого подбирался так, чтобы в образце

Таблица 1

№	σ^*	ε_k	$E \cdot 10^{-3}$	$E_1 \cdot 10^{-3}$	$E_2 \cdot 10^{-3}$	σ_1	σ_2	τ	ε''	$\Delta\varepsilon''$
14	2,84	3,89	218,7	166,4	143,4	280,6	256,4	3,7	4,02	0,31
15	3,04	3,81	200,5	171,8	140,8	273,7	255,6	8,5	3,94	0,31
16	3,04	3,92	204,9	173,8	142,3	272,7	257,1	6,5	4,15	0,41
2	20,3	2,86	205,5	176,1	148,4	274,0	—	—	2,81	0,13
10	20,5	3,85	197,7	152,9	118,2	273,7	256,4	5,0	3,88	0,23
12	22,4	3,69	195,6	164,4	148,1	279,6	—	—	3,61	0,09
4	44,8	0,17	196,2	172,2	119,1	279,6	—	—	1,65	1,67
5	45,6	0,15	192,8	184,6	139,7	271,7	—	—	1,63	1,63
13	48,8	3,68	229,2	165,9	133,0	277,6	259,0	3,2	3,73	0,22
21	49,8	2,11	141,5	158,2	124,8	261,4	—	—	2,50	0,57
22	40,1	2,56	209,8	159,0	146,9	281,0	—	—	2,44	0,05
17	—	3,53	219,6	—	—	—	—	—	3,39	0,04
18	—	3,93	200,8	—	—	—	—	—	3,79	0,04

Таблица 2

№	σ^*	σ_k	ε_k	E	σ_p	σ_s	ε''	$\Delta\varepsilon''$	E_1
1	49,1	422	1,44	73 572	383	—	0,86	0	71 123
2	20,8	432	1,52	74 507	383	405	0,93	0	70 799
3	20,6	441	2,52	73 484	368	395	1,90	0	69 494
4	20,5	451	3,08	73 467	373	392	2,45	0,02	68 461
7	20,2	451	3,41	73 634	366	389	2,76	0	68 062
5	20,3	461	2,70	74 075	376	409	2,70	0,014	68 464
6	20,8	461	4,10	73 408	370	392	3,41	0,034	66 100
8	20,5	471	3,07	73 536	370	402	2,39	0	68 062
9	20,4	471	3,29	73 153	343	381	2,61	0	68 023
10	19,1	481	3,53	73 467	350	392	2,85	0	67 120

действовало заданное напряжение, отмечалась задержка ползучести, ранее обнаруженная в опытах [4].

На каждой ступени нагружения снимались и регистрировались показания прибора. В момент наложения последнего груза включался загрузочный кран и секундомер с ценой деления 0,1 сек, по которому через заданные интервалы времени производилось снятие отсчетов по индикаторам тензометра. Загружение бака водой продолжалось до тех пор, пока силовой рычаг заметно не наклонился. Это соответствовало полной разгрузке образца. В этот момент выключался кран и секундомер. Залитая в бак вода взвешивалась на аналитических весах и по ее весу и продолжительности заливки вычислялась скорость разгрузки σ^* .

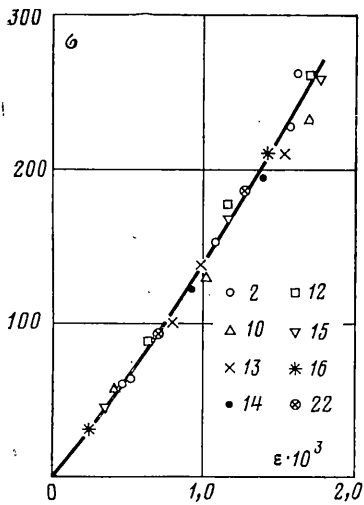
Тринадцать стальных образцов были нагружены до напряжения 294,3 МПа и разгружены. Одиннадцать из них разгружались с постоянными скоростями, изменявшимися в 17,2 раза, а два испытывались на разрывной машине ЦД 10/90. Нагружение производилось при весьма малой скорости взаимного смещения захватов. После выхода в зону малого упрочнения у обоих образцов наблюдалось многократное падение растягивающей нагрузки.

Разгрузке, осуществлявшейся ступенчато вручную, предшествовала пятиминутная выдержка. За это время у образца 17 напряжение упало на 12,6 МПа, а у образца 18 — на 12,1 МПа, а деформация увеличилась на 0,006% и 0,04% соответственно. Падение нагрузки сопровождалось малым удлинением образцов на базе прибора. Таким образом условие чистой релаксации не соблюдалось.

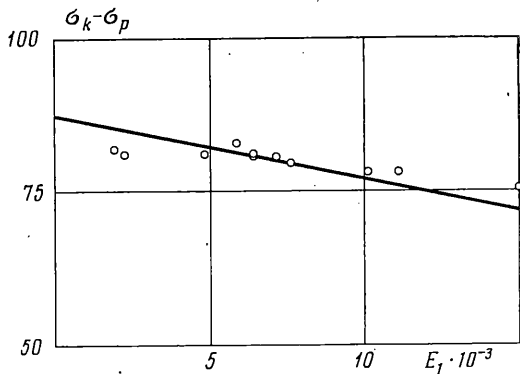
После указанной выдержки последующее малое уменьшение нагрузки приводило к убыванию накопленной деформации.

Основные результаты испытаний стальных образцов представлены в табл. 1, где в первой колонке стоит номер образца и приняты обозначения: σ^* — скорость нагружения (МПа/мин), ε_k — конечная деформация при нагружении (%), E — модуль упругости (МПа), E_1 , E_2 — наклоны верхнего и нижнего звена ломаной соответственно (МПа), σ_1 — напряжение с которого началась разгрузка (МПа), σ_2 — напряжение (МПа), при котором измерено время задержки ползучести τ (в секундах), ε'' — деформация после полной разгрузки (%), $\Delta\varepsilon''$ — приращение деформации (%) за период убывания напряжения до уровня σ_1 .

Несмотря на одинаковый уровень конечного напряжения и одинаковые условия испытаний образцов, как видно из табл. 1, деформация ε_k имеет очень большой выброс для образцов 4 и 5, что, по-видимому, обусловлено неоднородностью материала прутка, из которого были изготовлены образцы. Согласно правилу исключения резко выделяющихся результатов измерений, результаты испытаний этих образцов не рассматривались. Вместо них были дополнительно испытаны образцы 21 и



Фиг. 1



Фиг. 2

22. После исключения из рассмотрения образцов 4 и 5, разброс в ϵ_k остался большим, но дальнейшее исключение по указанному правилу оказалось недопустимым. Значение модуля упругости E образца 21 оказалось сомнительным. В результате статистической обработки обнаружено, что это значение E является выбросом и при определении среднего значения E и доверительного интервала для него оно в расчетах не использовалось.

Кривые разгрузки первоначально аппроксимировались двухзвенной ломаной с наклонами E_1 и E_2 . Отметим, что за 20 с разгрузки образца 4 деформация увеличилась до 1,83%, а за 30 с разгрузка образца 5 деформация увеличилась до 1,78%. Это видимо следует объяснить задержкой ползучести, имевшей место при $\sigma = 294,3$ МПа. Точки с этой ординатой располагались на соответствующих прямых.

За исключением упомянутых выбросов остальные характеристики использовались для подсчета средних значений и доверительных интервалов. Получены следующие результаты (в скобках указан коэффициент вариации): $E = 205100 \pm 8200$ МПа ($\nu = 1,8\%$); $E_1 = 169810 \pm 6770$ МПа ($\nu = 5,2$); $E_2 = 137050 \pm 8730$ МПа ($\nu = 8,3\%$); $\sigma_1 = 276,6 \pm 3,2$ МПа ($\nu = 1,5\%$). Данные испытаний образцов 17 и 18 при этом не учитывались. Видно, что для σ_1 значение ν мало. Это значит, что уровень напряжения, с которого начинается убывание деформации при разгрузке с фиксированными скоростями достаточно надежно воспроизводится и не зависит от σ' . На значения E_1 и E_2 величина σ' оказывает сравнительно малое влияние.

Найденное значение σ_1 отличается от среднего значения σ_1 , полученного при испытаниях на машине кинетического типа всего на 1,8%. На такой машине испытаны только два образца. Поэтому пока преждевременно делать окончательный вывод, что σ_1 не зависит от типа машины. Для такого вывода нужны дополнительные опытные данные.

Помимо аппроксимации кривых разгрузки двухзвенной ломаной использована зависимость $\sigma = (a + b\epsilon)$, где ϵ — полная деформация за вычетом остаточной. Коэффициенты a и b определялись по методу наименьших квадратов для каждого образца. В результате осреднения получены значения $a = 1,23 \cdot 10^5$ МПа и $b = 1,6 \cdot 10^7$ МПа. Для этих значений a и b на фиг. 1 сплошной линией изображена аппроксимирующая кривая (σ в МПа). Там же для десяти образцов нанесена часть произвольно выбранных экспериментальных точек. В нижней части фиг. 1 показано соответствие значков и номеров образцов. Выбор точек произведен таким образом, чтобы они не накладывались одна на другую. Как видно на фиг. 1, опытные точки сравнительно близко располагаются около кривой. Из этого можно заключить, что квадратичная зависимость σ от ϵ при разгрузке приемлемо согласуется с опытом.

Вторая серия опытов проведена на образцах из сплава Д16Т. Методика испытаний осталась прежней с тем лишь отличием, что из десяти образцов девять испытано почти с одинаковой скоростью разгрузки, но с разных уровней конечного напряжения σ_k . Результаты этих испытаний представлены в табл. 2, где σ_p — предел пропорциональности, а σ_s — предел текучести по допуску 0,1%. Если у стали на стадии разгрузки за счет ползучести значение $\Delta\epsilon''$ достигало, как правило, заметной величины, то у Д16Т оно отсутствовало или имело весьма малую величину. Обнаружено также, что разгрузка пластически деформированного сплава следует линейному закону. Наклон прямых E_1 не совпадает с E , а зависит от уровня конечного напряжения σ_k .

На фиг. 2 сплошной прямой изображена линия регрессии в зависимости от разности $\sigma_k - \sigma_p$ (МПа), уравнение которой есть: $E_1 = 77110 - 1020(\sigma_k - \sigma_p)$. Светлыми кружками обозначены опытные значения E_1 (в МПа). При $\sigma_k - \sigma_p = 8,7$ МПа две опытные точки совпали.

Как ранее установлено [6], ползучесть сплава Д16Т при комнатной температуре начинается при напряжениях $\sigma \geq \sigma_s$. Опыты с разгрузкой выполнены только при конечных напряжениях $\sigma_k > \sigma_s$. Для $\sigma_k = \sigma_p$ разгрузка происходит по прямой с наклоном E . По этой причине в качестве аргумента принята разность $\sigma_k - \sigma_p$. Для испытанной партии образцов сплава Д16Т получено $E = 73670 \pm 290$ МПа, $\sigma_p = 368 \pm 9$ МПа, $\sigma_s = 395 \pm 7$ МПа.

На основании проведенных опытов можно сделать следующие выводы: одновременное убывание напряжения и деформации пластически деформированной стали происходит с напряжения, составляющего 6% от конечного напряжения и не зависящего от скорости разгрузки; закон разгрузки стали приемлемо описывается квадратичной зависимостью; разгрузка пластически деформированного сплава Д16Т начинается с момента уменьшения напряжения и идет вдоль прямых с наклонами, зависящими от конечного напряжения. Чем больше конечное напряжение, тем меньше наклон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков А. М. Об устранении устаревших представлений в курсах сопротивления материалов. — В кн.: Сборник научно-методических статей по сопротивлению материалов, строительной механике и теории упругости, 1977, вып. 3, с. 46–53.
2. Жуков А. М. Некоторые особенности поведения металлов при упругопластическом деформировании. — В кн.: Вопросы теории пластичности. М.: Изд-во АН СССР, 1961, с. 30–57.
3. Жуков А. М., Кочин О. М. О разгрузке пластически деформированного сплава Д-16 — Тр. ВНИИ физ.-техн. и радиотехн. измерений, 1971, вып. 8 (38), с. 113–124.
4. Жуков А. М., Деформирование малоуглеродистой стали при фиксированных скоростях нагружения. — Проблемы прочности, 1974, № 12, с. 26–30.
5. Жуков А. М. Задержка ползучести малоуглеродистой стали при комнатной температуре. — Проблемы прочности, 1972, № 4, с. 54–58.
6. Жуков А. М. Ползучесть металлов при комнатной температуре после частичной разгрузки. — Изв. АН СССР. МТТ, 1984, № 5, с. 181–186.

Москва

Поступила в редакцию
7.VI.1985

Технический редактор Т. В. Скворцова

Сдано в набор 27.03.87 Подписано к печати 19.05.87 Т-05714 . Формат бумаги 70×108^{1/16}
Высокая печать Усл. печ. л. 16,8 Усл. кр.-отт. 24,6 тыс. Уч.-изд. л. 19,7 Бум. л. 6,0
Тираж 1450 экз. Зак. 310

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»,
103717 ГСП, Москва, К-62, Подсосенский пер., 21
2-я типография издательства «Наука», 121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 6