

- щие в упругом полупространстве под действием осесимметричного лучистого потока.— Физика и химия обработки материалов, 1969, № 3.
3. Калмыков А. А., Кондратьев В. Н., Немчинов И. В. О разлете мгновенно нагретого вещества и об определении его уравнения состояния по величине давления и импульса.— ПМТФ, 1966, № 5.
 4. Кондратьев В. Н., Немчинов И. В., Хазинс В. М. Расчет задачи о разлете нагреваемого поверхностного слоя вещества с учетом расслоения его на фазы.— ПМТФ, 1970, № 4.
 5. Кондратьев В. Н., Немчинов И. В., Померанцев В. И., Хазинс В. М. Задача о движении плоского слоя конденсированного вещества навстречу потоку излучения с учетом испарения и отколов.— В кн.: Успехи механики деформируемых сред. М.: Наука, 1975.
 6. Калмыков А. А., Немчинов И. В., Петрухин А. И. Экспериментальное исследование разлета мгновенно нагретого вещества и возникающего импульса при концентрациях энергии, меньших теплоты испарения.— ПМТФ, 1966, № 6.
 7. Свиридов В. А., Глушак Б. П., Новиков С. А. Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах. Черногловка: изд. Ин-та хим. физики АН СССР, 1978.
 8. Захаров С. И., Лохов Ю. Н. и др. Откольный механизм разрушения поверхности оптически прозрачных диэлектриков сфокусированным моноимпульсом ОКГ.— Прикладная спектроскопия, 1975, т. 23, вып. 2.
 9. Лохов Ю. Н., Моспанов В. С., Фивейский Ю. Д. Термические напряжения в поверхностном слое прозрачного твердого диэлектрика.— Физика и химия обработки материалов, 1976, № 1.
 10. Миркин Л. И. Физические основы обработки материалов лучами лазеров. М.: Изд-во МГУ, 1975.
 11. Аппен А. А. Химия стекла. Л.: Химия, 1974.
 12. Стекло/Под ред. Н. М. Павлушкина. М.: Стройиздат, 1973.

УДК 620.178.7 : 539.382

ВЛИЯНИЕ ПРЕДЫСТОРИИ НАГРУЖЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

*А. Г. Иванов, Ю. Г. Кашаев, А. И. Коршунов,
С. А. Новиков, Н. Н. Попов, В. А. Рыжанский,
В. И. Цыпкин
(Москва)*

Рациональное проектирование конструкций, работающих при интенсивных динамических нагрузках, вызывает необходимость детального исследования свойств материалов при различных режимах высокоскоростной деформации. Для наиболее полного использования резервов прочности материала требуется знание параметров уравнения состояния его в области глубокой пластичности при значительных перепадах скорости деформации. В подобных случаях [1, 2] на свойства материала может оказывать существенное влияние предыстория нагружения [3]. Известен, например, эффект более сильного упрочнения при высокоскоростной деформации, чем при деформации с меньшей скоростью [4, 5].

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование влияния предыстории нагружения на механические свойства нержавеющей стали. Данные об аналогичных исследованиях таких важных конструкционных материалов, как стали, в литературе фактически отсутствуют.

Исследование проводилось при температуре 293 ± 3 К на образцах из листовой стали 12Х18Н10Т, закаленной с охлаждением на воздухе ($\sigma_{0,2} = 0,33$ ГПа, $\sigma_B = 0,63$ ГПа, $\delta = 61,5\%$). В процессе исследования образцы подвергались одноосному растяжению при переменных (спадающих от максимума до нуля) и постоянных скоростях деформации $\dot{\epsilon}$, в результате чего получены зависимости истинного напряжения σ от истинной (логарифмической) деформации ϵ .

Динамические испытания в режиме переменной скорости деформации проводились методом импульсного расширения кольцевых образцов [6, 7] (наружный радиус $R_0 = 50$ мм, толщина 1 мм, высота 5 мм), которым с помощью взрывного устройства коротким ударом изнутри (за $\sim 0,2$ мкс) сообщались различные начальные скорости w_0 . В дальнейшем кольца симметрично расширялись по инерции, тормозясь радиальными составляющими окружающих напряжений:

$$(1) \quad \sigma = -\rho R(dw/dt),$$

где ρ — плотность материала; R и $w = dR/dt$ — соответственно текущие значения наружного радиуса и радиальной скорости расширяющегося кольца; t — время. В опытах проводилась регистрация зависимостей $r(t) = R(t) - R_0$, которые приведены точками на фиг. 1. Номера точек на фиг. 1, 2, 4, 5 соответствуют номерам опытов в таблице, где $\varepsilon_0 = w_0/R_0$ — начальная скорость окружной деформации, ε_1, t_1 — максимальная окружная деформация и время ее достижения, ε_2 — остаточная окружная деформация, A — постоянная интегрирования уравнения (1) (см. ниже).

Используя зависимости $r(t)$, можно с помощью (1) получить динамические зависимости $\sigma(\varepsilon)$, где $\varepsilon = \ln(R/R_0)$. Однако уравнение (1) весьма чувствительно к разбросу экспериментальных значений зависимости $r(t)$, поэтому ее необходимо аппроксимировать гладкой функцией. Методика аппроксимации отличалась от [6, 7]. Уравнение (1) первоначально интегрировалось в предположении

$$(2) \quad \sigma(\varepsilon) = \sigma = \text{const при } 0 \leq t \leq t_1$$

(в интервале $0 \leq t \leq t_1$ реализуется наибольший перепад скоростей). В рамках известной модели жестко-вязкопластического тела с линейным упрочнением

$$(3) \quad \sigma = \sigma_0 + k\varepsilon + \eta \dot{\varepsilon}$$

(σ_0 — статический предел текучести, k — модуль упрочнения, η — динамическая вязкость) условие $\sigma(\varepsilon) = \text{const}$ физически означает, что в процессе инерционного расширения кольца происходит взаимная компенсация упрочнения с ростом ε и разупрочнения из-за снижения $\dot{\varepsilon}$ при торможении кольца.

Решение уравнения (1) в предположении (2) имеет вид *

$$(4) \quad Y(x) = AT(t),$$

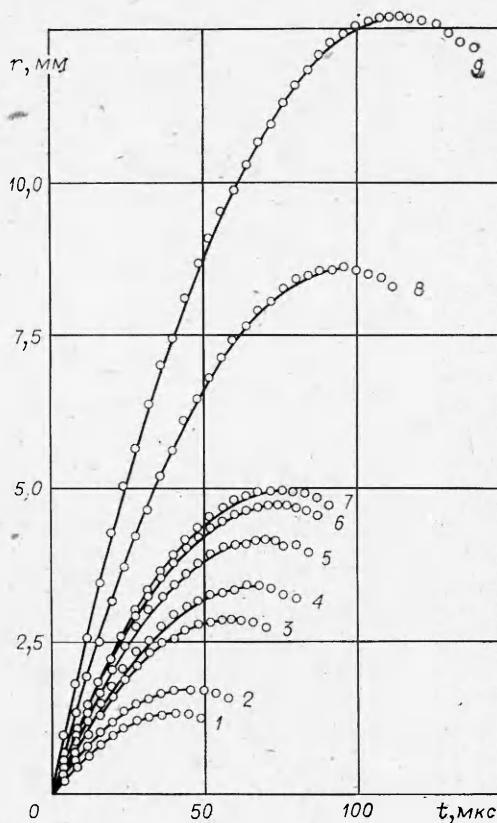
где

$$(5) \quad Y(x) = ax - bx^3/3 + cx^5/5 - dx^7/7, \quad T(t) = 1 - t/t_1;$$

$$(6) \quad x = \sqrt{1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1}}, \quad \varepsilon = \ln\left(1 + \frac{r}{R_0}\right),$$

$$a = 1 + \varepsilon_1 + \frac{\varepsilon_1^2}{2} + \frac{\varepsilon_1^3}{6}, \quad b = \left(1 + \varepsilon_1 + \frac{\varepsilon_1^2}{2}\right) \varepsilon_1,$$

* Точного решения уравнение (1) не имеет из-за появления в его первом интеграле экспоненты e^ε . Решение (4) получено после ее замены первыми четырьмя членами разложения в ряд Тейлора (погрешность менее 0,01%).



Ф и г. 1

Номер опыта	w_0 , м/с	$\frac{\varepsilon_0}{c} - 1$	ε_1 , %	t_1 , мкс	ε_2 , %	A
1	65	1300	2,62	41,0	—	1,0175
2	75	1509	3,38	46,0	—	1,0266
3	97	1948	5,54	59,0	—	1,0371
4	108	2161	6,62	64,0	—	1,0444
5	120	2402	7,98	70,0	7,64	1,0536
6	130	2595	9,05	74,0	8,70	1,0608
7	133	2665	9,46	75,5	—	1,0636
8	183	3656	15,85	96,0	—	1,1071
9	229	4572	22,60	114,0	—	1,1532

$$c = (1 + \varepsilon_1) \frac{\varepsilon_1^2}{2}, \quad d = \frac{\varepsilon_1^3}{6};$$

$$(7) \quad \varepsilon_1 = \rho(R_0 \varepsilon_0)^2 / 2\sigma, \quad A = \varepsilon_0 t_1 / 2\varepsilon_1.$$

Если предположение (2) верно, то зависимость (4) должна быть линейной. В противном случае необходимо эмпирически искать корректирующую функцию, например $\Phi(t) = Y(x)/T(t)$, которая и будет показателем того, насколько реальное напряженное состояние отличается от (2).

Зависимости (4), полученные по экспериментальным точкам, оказались весьма близки к линейным. Это позволило заключить, что (в пределах погрешности эксперимента) в опытах при $0 \leq t \leq t_1$ имело место напряженное состояние вида (2).

Постоянные интегрирования A, найденные эмпирически по зависимости (4) для каждого опыта, приведены в таблице.

Аппроксимирующие зависимости $r(t)$, полученные по формулам, вытекающим из (4) — (6) (при $0 \leq x \leq 1$), приведены на фиг. 1 (сплошные линии) и вполне удовлетворительно согласуются с экспериментальными.

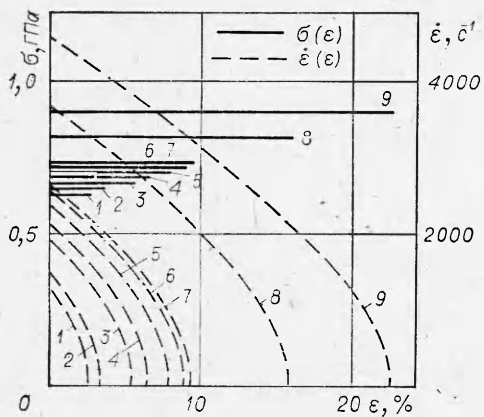
Наконец, формулы (6), (7) и первый интеграл уравнения (1) дают искомые зависимости $\sigma(\varepsilon)$ и $\varepsilon(\varepsilon) = \varepsilon_0 e^{-\varepsilon} \sqrt{1 - \varepsilon/\varepsilon_1}$, приведенные на фиг. 2. По оценкам, погрешности зависимостей $\varepsilon(\varepsilon)$ и $\sigma(\varepsilon)$ не превышают соответственно 5 и 10%.

Пользуясь фиг. 2 как номограммой, можно от зависимостей $\sigma(\varepsilon)$ при переменных ε перейти к $\sigma(\varepsilon)$ при $\varepsilon = \text{const}^*$ (см., например, зависимости $a - z$ на фиг. 3).

Динамические испытания образцов в режиме растяжения с постоянной скоростью проводились на маятниковом копре по методике [8] (цилиндрические образцы растягивались при $\varepsilon = 840 \text{ с}^{-1}$), а также модифицированным методом Кольского [9] с помощью взрывного устройства, в котором образец в виде колпачка помещался между ударным и опорным стержнями одинакового поперечного сечения и подвергался растяжению при $\varepsilon = 1200 \text{ с}^{-1}$. В обоих случаях зависимости $\sigma(\varepsilon)$ и $\varepsilon(t)$ определялись с помощью тензометрирования. Оцененные погрешности определения $\sigma(\varepsilon)$ находились в пределах 10—14%. Зависимости $\sigma(\varepsilon)$, полученные обоими методами, оказались весьма близки (фиг. 3, кривая δ).

Статические испытания данного материала проводились на плоских образцах по стандартной методике при $\varepsilon \approx 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Статическая зависимость $\sigma(\varepsilon)$ (фиг. 3, кривая e) получена путем обработки машинных диаг-

* Необходимо на фиг. 2 провести горизонтальную линию по требуемому значению $\varepsilon = \text{const}$, а точки ее пересечения с кривыми $\varepsilon(\varepsilon)$ для каждого опыта спроектировать на соответствующие зависимости $\sigma(\varepsilon)$ по ось абсцисс. Эти проекции суть координаты ε , σ точек искомой зависимости.



Ф и г. 2

кой (кривая e) зависимостей $\sigma(\epsilon)$ показывает, что при $\epsilon > 1\%$ углы их наклона близки, поэтому можно принять, что модуль упрочнения стали практически не зависит от предыстории нагружения и составляет $k = d\sigma/d\epsilon \approx 1,4$ ГПа.

Наиболее резкое динамическое упрочнение стали с ростом $\dot{\epsilon}_0$ происходило при малых ($\sim 0,3-0,5\%$) деформациях в процессе перехода материала в пластическое состояние, результатом чего было повышение предела текучести* — явление для сталей общеизвестное.

Согласно результатам наших опытов с кольцами, используя значения ϵ и σ при заданных величинах ϵ на фиг. 2 и используя модель (3), можно оценить динамическую вязкость стали:

$$(8) \quad \eta = (\sigma - \sigma_0 - k\epsilon) / \dot{\epsilon}.$$

Зависимость (8), полученная при $\sigma_0 = \sigma_{0,2}$, $\dot{\epsilon} \leq 5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ и $\epsilon = 1 - 22\%$, приведена на фиг. 4 и может быть выражена в виде

$$(9) \quad \eta = 5,7 \cdot 10^4 + 2,5 \cdot 10^8 \dot{\epsilon}^{-1}, \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Очевидно, вязкость убывает с увеличением скорости деформации, что качественно согласуется с известными результатами исследований (см., например, [11]). Отметим, что значения $\eta(\epsilon)$, приведенные на фиг. 4, практически не зависят от ϵ в исследованном интервале.

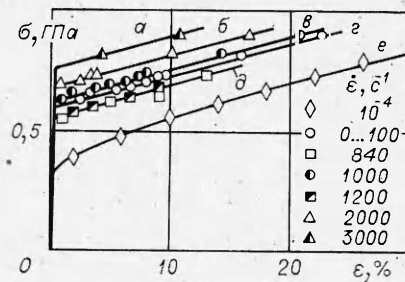
С учетом (9) уравнение состояния стали (3) в случаях спада $\dot{\epsilon}$ от некоторого максимума до нуля принимает вид

$$(10) \quad \sigma = 0,58 + 1,4\epsilon + 5,7 \cdot 10^{-5} \dot{\epsilon}, \text{ ГПа}.$$

Из формулы (10) и фиг. 3 следует, что при экстраполяции соответствующих динамических зависимостей $\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})$ к $\dot{\epsilon} = 0$ предел текучести ($\sigma_1 \approx 0,6$ ГПа) почти вдвое превышает его значение, полученное при статических испытаниях ($\sigma_{0,2} = 0,33$ ГПа). Этот эффект, являющийся, по-видимому, следствием различия в предысториях нагружения образцов, может быть объяснен релаксацией напряжения:

Действительно, динамическое напряжение $\sigma_1 \approx 0,6$ ГПа ($\dot{\epsilon}_0 = 0$, $\epsilon \approx 0,3\%$) достигается за время, равное четверти периода упругих колебаний кольца ($t_1 \approx 15$ мкс) при предельной начальной скорости деформации $\dot{\epsilon}_* \approx 300 \text{ с}^{-1}$, не переводящей кольцо в пластическое состояние. С дру-

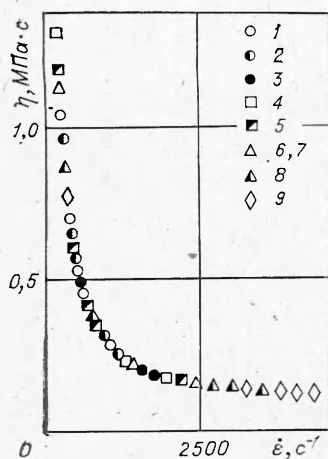
* Под пределом текучести в данной работе понимается сопротивление деформированию в начале пластической деформации стали (при $\epsilon \approx 0,3$).



Ф и г. 3

рам с использованием принципа сохранения объема при деформировании [10].

Сравнение на фиг. 3 динамических (кривые $a - d$) и статических (кривая e) зависимостей $\sigma(\epsilon)$ показывает, что при $\epsilon > 1\%$ углы их наклона близки, поэтому можно принять, что модуль упрочнения стали практически не зависит от предыстории нагружения и составляет $k = d\sigma/d\epsilon \approx 1,4$ ГПа.



Ф и г. 4

$15 \cdot 10^{-6} \text{ с} < \tau < 40 \text{ с}$, в опытах с кольцами в отличие от статических испытаний пройти не успевают.

Заметное различие во взаимном расположении на фиг. 3 зависимостей $\sigma(\epsilon)$ с близкими значениями ϵ (ср. 3 и 5, 4 и 6), но с разными предысториями нагружения можно объяснить совместным влиянием релаксации напряжений и динамического упрочнения. Примером последнего являются результаты статического растяжения образцов, изготовленных из колец, сохраненных в опытах 5, 6 (см. таблицу). На фиг. 5 статические зависимости $\sigma(\epsilon)$, полученные на этих образцах (кривые 5', 6'), как бы продолжают динамические 5, 6*, но в области пластичности расположены существенно выше статической кривой $\sigma(\epsilon)$, полученной для материала в исходном состоянии (см. там же, кривая s).

Таким образом, полученные в работе экспериментальные данные о механических свойствах стали 12X18H10T показали следующее: 1) за пределами упругости модуль упрочнения материала практически не зависит от режима нагружения и скорости деформации; 2) при растяжении стали в различных скоростных режимах на ее механические свойства оказывают существенное влияние эффекты, связанные с предысторией нагружения (в частности, релаксационные процессы и динамическое упрочнение). Так, при растяжении со скоростью, спадающей от некоторого максимума, динамический предел текучести стали из-за релаксации примерно в 2 и более раз превышает статический; 3) имея в виду влияние предыстории нагружения, изучение механических свойств чувствительных к ней материалов, предназначенных для работы при интенсивных динамических нагрузках, следует проводить при деформировании не только с постоянными, но и с переменными скоростями в режимах их изменения, наиболее близких к реальным условиям работы конструкции. Например, режим испытания кольцевых образцов в данном исследовании близок к режиму работы цилиндрических оболочек при их импульсном (взрывном) нагружении изнутри.

Поступила 9 VII 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А. Г., Новиков С. А., Сеницын В. А. Исследование поведения замкнутых стальных оболочек при взрыве внутри них зарядов взрывчатого вещества. — ПМТФ, 1968, № 6.
2. Цыкин В. И., Иванов А. Г. и др. Влияние масштаба, геометрии и заполняющей среды на прочность стальных сосудов при внутреннем импульсном нагружении. — Атомн. энергия, -1976, т. 41, вып. 5.

* Этим подтверждается соответствие зависимостей $\sigma(\epsilon)$ на фиг. 2 реальному состоянию материала в опытах с кольцами.

3. Васин Р. А., Ленский В. С., Ленский Э. В. Динамические зависимости между напряжениями и деформациями.— В кн.: Проблемы динамики упругопластических сред. М.: Мнр, 1975.
4. Пашков П. О. О методике эксперимента при обработке металлов ударными волнами.— В кн.: Высокоскоростная деформация. М.: Наука, 1971.
5. Борисевич В. К., Солодянкин С. Н. и др. Повышение прочностных характеристик листовых деталей путем их взрывного формообразования с оптимизацией параметров технологического процесса.— Проблемы прочности, 1980, № 9.
6. Hoggat C. B., Recht R. F. Stress-strain data obtained at high rate using an expanding ring.— Experimental Mechanics, 1969, vol. 9, N 10.
7. Рыжанский В. А., Минеев В. Н. и др. Экспериментальное исследование взрывного расширения тонких колец из отожженного алюминиевого сплава.— ФГВ, 1976, № 1.
8. Попов Н. Н., Стрекин В. П. и др. Методика получения диаграмм растяжения при испытаниях на маятниковых копрах.— Физ.-хим. механика материалов, 1980, № 5.
8. Кашаев Ю. Г., Новиков С. А. и др. Определение температурной зависимости механических свойств металлов с использованием взрывного нагружения и импульсного электрического нагрева.— Проблемы прочности, 1981, № 2.
10. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975.
11. Степанов Г. В. Модель механического поведения металлических материалов при действии нагрузок импульсного характера.— Проблемы прочности, 1978, № 5.

УДК 620.178.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ВНУТРЕННЕМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

*Л. Н. Александров, А. Г. Иванов, В. Н. Минеев,
В. И. Цылкин, А. Т. Шитов
(Москва)*

Проведенные к настоящему времени исследования оболочек, подвергнутых внутреннему взрывному нагружению, выявили основные закономерности их поведения. Упругая и упругопластическая реакция тонкостенных оболочек, заполненных водой, определялась в работах [1, 2], а оболочек, заполненных воздухом при нормальных условиях, — в [3—7].

В данной работе представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований, посвященных выяснению закономерностей поведения сферических оболочек различной толщины в области пластических деформаций (вплоть до разрушения) при их однократном внутреннем взрывном нагружении.

Исследовалось поведение сферических оболочек массой M с внутренним и наружным радиусами соответственно R_{10} и R_{20} и толщиной стенок h_0 (фиг. 1), заполненных нормальной воздушной атмосферой, при взрыве внутри них заряда ВВ I . Оболочки 2 изготовлены из стали 35 и отожжены для снятия остаточных напряжений в зоне сварных швов. Механические свойства материала оболочек проконтролированы испытаниями образцов-свидетелей ($\sigma_b = 0,55$ ГПа, $\sigma_{s(0,2)} = 0,30$ ГПа, $\delta = 20\%$)*.

В опытах использовались оболочки с одинаковым внутренним радиусом $R_{10} = 153$ мм и различной толщиной стенок, а также геометрически подобные оболочки, уменьшенные в 4 раза.

Сферические заряды взрывчатого вещества ТГ 5/5 (состав: 50% вес. тротил + 50% гексоген, плотность $1,65 \cdot 10^{-3}$ кг/см³) радиусом \bar{R}_z , массой m , располагаемые в центре оболочек, инициировались из центра. Каждая оболочка подвергалась взрывному нагружению только один раз.

В эксперименте тензодатчиками 3 (фиг. 1) по методу [8] регистрировалась деформация оболочки во времени $\varepsilon(t)$. Типичная осциллограмма $\varepsilon(t)$ приведена на фиг. 2 (опыт 7). Обработкой экспериментальных зависимостей $\varepsilon(t)$ определялись следующие величины: v^* — максимальная ско-

* σ_b , σ_s , ε_0 — соответственно временное сопротивление, предел текучести и относительное удлинение.