

довательно, в случае одноосного напряженного состояния предел текучести равен 0,11—0,17 ГПа, что согласуется с полученной зависимостью $\sigma - \epsilon$.

Подведем итоги проведенного исследования.

1. В эксперименте было получено симметричное радиальное расширение тонких колец из отожженного сплава Д16 с начальной скоростью до 180 м/с, что соответствует скорости деформации ~ 3400 1/с.

2. Значения $\ln \epsilon_0$ находятся в линейной зависимости от $\ln(R_0/R_{ВВ})$, которая может быть выражена аналитически формулой, полученной методом наименьших квадратов

$$\ln \epsilon_0 = 11,34 - 3,39 \ln(R_0/R_{ВВ}).$$

Эта формула получена только для колец с сечением 2×5 мм.

3. При расширении колец с начальной скоростью 30—90 м/с наблюдалось их торможение до полной остановки с последующим упругим сжатием, переходящим в упругие колебания.

Наибольшая деформация кольца, наблюдавшаяся в опытах ($\sim 19\%$), значительно превышает предельную статическую деформацию данного материала ($\sim 12\%$) и не является, по-видимому, пределом. Это свидетельствует о существенном улучшении пластических свойств материала при динамическом деформировании [6].

4. Замена квадратичной параболой участка экспериментальной зависимости $\epsilon - t$ в интервале $0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{\max}$ приводит к погрешности при определении напряжений не более 10%.

5. Динамическая зависимость $\sigma - \epsilon$ слабо зависит от скорости деформации в пределах изменения последней до 2000 1/с.

Поступила в редакцию
20/XI 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. F. E. Allison, R. F. Watson. J. Appl. Phys., 1960, 31, 5, 842.
2. F. E. Allison, I. T. Schriempf. J. Appl. Phys., 1960, 31, 5, 846.
3. C. R. Hoggat, R. F. Recht. J. Appl. Phys., 1968, 39, 3, 1856.
4. Н. С. Санасарян. ФГВ, 1971, 7, 4, 600.
5. А. Г. Иванов, Л. И. Кочкин и др. ФГВ, 1974, 10, 1, 127.
6. А. Г. Иванов, В. Н. Минеев и др. ФГВ, 1974, 10, 4.
7. В. М. Кузнецов. ПМТФ, 1968, 2.
8. Э. А. Кошелев и др. ПМТФ, 1971, 2.
9. В. М. Кузнецов. ФГВ, 1973, 9, 4.
10. C. R. Hoggat, R. F. Recht. Exp. Mech., 1969, 9, 10, 441.
11. P. C. Johnson, B. A. Stein, R. S. Davis. Symposium on Dynamic Behavior of Materials. ASTM Spec. Tech. Pub., 1962, 336.
12. Дж. К. Егер. Упругость, прочность и текучесть. М., Машгиз, 1961.
13. С. А. Новиков, В. А. Синицын и др. ФММ, 1966, 21, 3, 542.

УДК 532.593

ИЗМЕНЕНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ СТАЛИ ПОСЛЕ НАГРУЖЕНИЯ ПЛОСКИМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Т. С. Тесленко

(Новосибирск)

Расчеты затухания плоских ударных волн в металле, приведенные в [1], показывают, что давление на начальном участке убывает довольно быстро. Если учесть, что эти расчеты проведены по газодинамической

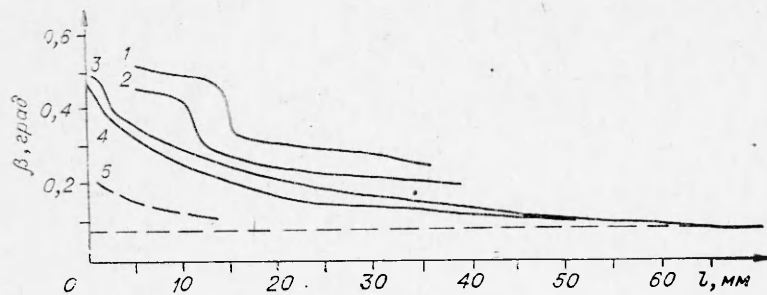


Рис. 1. Изменение физического уширения β линии (211) с глубиной образцов при различных способах нагружения.

1 — 14 мм ТГ; 2 — 7 мм ТГ; 3 — 14 мм гексогена; 4 — 7 мм гексогена; 5 — 14 мм аммонита.

модели, т. е. без учета диссипации энергии в металле, то можно ожидать, что в действительности давление падает еще быстрее. В то же время наблюдаемое пропечатывание поверхностного рельефа на глубине до 60 мм [2], где уже не фиксируется повышение микротвердости, дает основание предположить, что в металле происходят некоторые изменения, к которым микротвердость недостаточно чувствительна. В настоящей работе (рис. 1) показано, что для достаточно интенсивных ударных волн уширение рентгеновских дифракционных линий, наиболее сильное у поверхности нагружения и уменьшающееся в глубь материала, на этой глубине (около 60 мм) еще существенно отличается от исходного.

В работах [3, 4] исследовалась тонкая структура армко-железа после обработки плоскими ударными волнами различной интенсивности. Однако в этих работах не учитывалось, что давление на фронте ударной волны существенно меняется при прохождении волны в глубь образца. В связи с этим интересно проследить изменение тонкой структуры металла в глубь образцов после прохождения плоских ударных волн различных давлений и длительностей нагрузок.

Эксперименты по нагружению образцов (Ст. 3 или Ст. 10) плоскими ударными волнами проводились по схеме, аналогичной приведенной в [5]. Стопка из 4—6 плотно отполированных образцов диаметром 30, общей высотой 40—60 мм помещалась в массивную стальную обойму и накрывалась стальной пластиной диаметром 60, толщиной 5 мм. В качестве ВВ использовался литой заряд тротил — гексоген 50/50 (высота заряда 7 и 14 мм), гексоген с высотой заряда 7 и 14 мм и аммонит 14 мм. Плоская ударная волна инициировалась в случае заряда ТГ генератором из ТГ и гексогена; при заряде из гексогена — аналогичным генератором из гексогена и аммонита; в опытах с аммонитом использовался просто насыпной конус высотой 14 мм.

Исследовалась только центральная часть образцов, где фронт ударной волны был наиболее близок к плоскому. Поскольку диаметр заряда был во всех случаях 40 мм, можно считать, что до глубины 20 мм фронт ударной волны не искажался боковой разгрузкой. После нагружения образцы освобождались от обоймы и с них стравливался поверхностный слой ($\sim 0,2$ мм). Осадка верхних образцов составляла не более 5—7%, более глубоко расположенные образцы по высоте практически не менялись.

Съемки проводились на аппарате ДРОН-1 в $Fe K_{\alpha}$ -излучении. Фиксировались линии (110) и (211), так как линия (220) в большинстве случаев была настолько слабой и размытой, что ошибки при определении интегральной ширины линии значительно превышали выигрыш в точности из-за большего угла дифракции.

Определение характеристик тонкой структуры велось по методу аппроксимации [6]. Результаты измерения физического уширения линии

(211) представлены на рис. 1. Поскольку 5-миллиметровые закрывающие пластинки в опытах с ТГ не сохранились, соответствующие кривые начинаются с глубины 5 мм от контакта с ВВ. Резкое изменение хода кривых на глубине 11—15 мм для опытов с ТГ и на глубине ~ 2 мм для опыта с гексогеном (14 мм) следует, по-видимому, отнести к обратимому фазовому переходу в железе. Если принять, согласно [7], что фазовый переход в железе происходит при давлениях выше 130—150 кбар, то в опытах ТГ 14 и ТГ 7 мм давление падает от 380 (на поверхности контакта с ВВ) до 130—150 кбар на глубине 11 и 15 мм соответственно, а в опыте с 14 мм гексогена — от 220 до 130—150 кбар на расстоянии примерно 2 мм от поверхности. Замеры микротвердости полностью подтверждают эти результаты.

Однако если сравнить глубины, где давления уже становятся недостаточными для прохождения фазового перехода, с кривыми затухания плоских ударных волн контактного взрыва, приведенными в [1] то полученные в настоящей работе оценки дают значительно более быстрое затухание давления. Надо заметить, что в [1] приведены расчеты для металлов, не имеющих фазовых переходов (ввиду трудности теоретических исследований для железа из-за аномального хода ударной адиабаты). В рассматриваемой работе оценивался спад давления по кривой для меди, поскольку медь и железо близки по величине ρ . В экспериментах авторов [8] отмечено, что, несмотря на близость ударных адиабат меди и железа, затухание ударной волны в железе идет, по крайней мере на начальном участке, гораздо быстрее. В [9] сделана попытка оценить затухание второй ударной волны в железе за счет фазового перехода. Приведенная в ней формула $p = 70 \exp(-x/D_1 \tau)$ (где p — скачок давления на второй ударной волне, т. е. $p = p_{\max} - 130$ кбар, $D_1 \tau = 0,17$ см для железа) дает для ударной волны с $p_{\max} = 200$ кбар спад до давления фазового перехода ~ 150 кбар на расстоянии около 3,5 мм, что сравнимо с глубиной фазового перехода в опыте с гексогеном 14 мм (см. рис. 1). Следовательно, влияние фазового перехода и образование в связи с этим двухволновой конфигурации на затухание ударных волн в железе может быть весьма существенно.

Импульс давления при данной конфигурации заряда с генератором плоской волны имеет треугольную форму, длительность полуспада составляет примерно 1 мкс при толщине слоя ВВ 14 мм и $\sim 0,5$ мкс при толщине слоя 7 мм. Поэтому можно оценить время, в течение которого давление превышало величину 130—150 кбар: при толщине слоя ТГ 14 мм $\sim 1,6$ мкс, в случае 7 мм ТГ $\sim 0,8$ мкс. В области, где существовал фазовый переход, наблюдается некоторое насыщение по уровню уширения линий, и влияние различной длительности нагрузки на уширение β не ощущается. В той области, где фазовый переход отсутствовал, надо сравнить уширение на таких глубинах, где было одинаковое отношение l/h (l — глубина от контакта с ВВ, h — толщина слоя ВВ), т. е. на глубинах, где расчетное давление одинаково. Для образцов, нагруженных слоем ТГ 14 мм, уширение на глубине 28 мм приблизительно равно β для слоя ТГ 7 мм на глубине 14 мм ($l/h = 2$). Следовательно, в данном случае влияние длительности импульса на величину β не ощущается, существенно только давление на фронте волны. Для образцов, нагруженных гексогеном, это положение выполняется хуже. Возможно, в этом случае сильнее сказывается влияние генератора плоской волны на длительность импульса давления. Приведенные в [10] данные экспериментальных замеров изменения давления в глубь стального образца от заряда тротила высотой 10 мм (рис. 2) показывают монотонное затухание максимального давления ударного сжатия с удалением от поверхности нагружения. Глубина, где оно падает до давления фазового перехода (~ 150 кбар), равна 1,3 толщины слоя ВВ, что удовлетворительно согласуется с нашей оценкой глубины, до которой распространялся фазо-

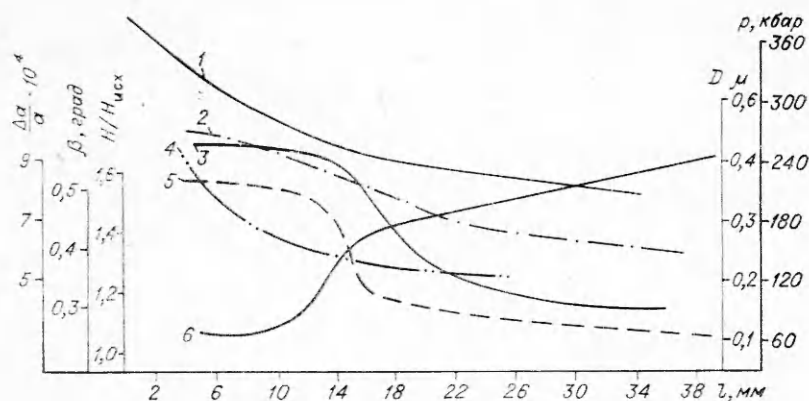


Рис. 2. Изменение характеристик тонкой структуры и относительной твердости для образца, нагруженного слоем ТГ 14 мм.

1 — расчет p для меди по данным [1]; 2 — $\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^4$; 3 — $\frac{\beta}{H_{исх}}$; 4 — $p_{эксп}$ [10]; 5 — β ; 6 — D_{μ} .

вый переход, и подтверждает вывод о значительно более быстром убывании давления с глубиной, чем дает газодинамическая модель.

Сравнение уширения рентгеновских линий с замерами микротвердости показывает, что уширение — более чувствительная характеристика к слабому упрочнению, чем микротвердость. Уширение — величина, усредненная по большому количеству кристаллов, поэтому она дает меньший разброс значений, а на величину микротвердости оказывает влияние неравномерность упрочнения различных зерен, что приводит к большому разбросу. Однако если значение микротвердости определять по большому числу замеров на одной глубине, то средние значения дадут примерно ту же чувствительность к слабому наклепу, что и уширение рентгеновских линий.

В опытах с железом, обработанным ударной волной по нашей схеме, обнаружена прямая зависимость между уширением рентгеновских линий β и средними значениями микротвердости в области, где отсутствовал фазовый переход. В этой области m/β — доля физического уширения линий, связанная с измельчением блоков, мала ($\sim 0,2$) и примерно постоянна. Вследствие этого кривые изменения микронапряжений $\Delta a/a$ и дисперсности $1/D$ (D — размер блоков) с глубиной подобны кривым для β . Поэтому в области невысоких давлений зависимость между величиной микронапряжений $\Delta a/a$ и микротвердостью, а также между величиной $1/D$ и микротвердостью тоже прямая. В той области, где существовал обратимый фазовый переход, дисперсность блоков существенно выше, в то время как уровень микронапряжений увеличивается в меньшей степени (см. рис. 2).

В работе [11] приведены кривые падения твердости с расстоянием в образцах из Ст. 3 после прохождения плоских ударных волн от трехмиллиметрового ударника с давлением при соударении 425 и 250 кбар. Несмотря на несколько отличный от рассматриваемого способ нагружения, изменение микротвердости с глубиной имеет те же характерные особенности: «насыщение» на начальном участке, резкий спад и затем медленное убывание почти до исходной. Отличие использованного в [11] метода нагружения от использованного в данной работе заключается в основном в характере разгрузки: в описываемом здесь случае она должна быть менее крутой. Этим, видимо, и объясняется менее резкий спад микротвердости.

В работах [3, 4, 12], где исследовалось армко-железо после нагружения плоскими ударными волнами, отмечается резкое изменение всех характеристик в области давлений 150—200 кбар. Так, в [3] наблюда-

ется изменение микроструктуры, резкое уменьшение величины блоков, а также изменение магнитных характеристик армко-железа. В работе [12] на графике зависимости H_v от β (220) существует резкий перелом в районе давлений 200 кбар для ударно-нагруженных образцов, а при меньших давлениях и для статически деформированных образцов эта зависимость прямая. По-видимому, отмеченное резкое изменение всех рассмотренных характеристик материала в данном диапазоне давлений следует отнести к прошедшему обратимому фазовому переходу в железе, хотя на основании этих данных трудно уточнить величину давления, при котором он имеет место.

*Поступила в редакцию
16/XII 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
2. А. А. Дерибас, В. С. Захаров и др. ФГВ, 1974, 10, 6.
3. А. Н. Киселев, Т. М. Соболенко, Т. С. Тесленко. ФГВ, 1974, 10, 4.
4. В. В. Бражнев, З. М. Гелунова, Л. И. Герасименко.— В сб.: Металловедение и прочность материалов. Вып. 4. Волгоград, 1972.
5. Т. М. Соболенко, Т. С. Тесленко. ФГВ, 1973, 9, 4.
6. С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. Рентгенографический и электроннооптический анализ. М., «Металлургия», 1970.
7. C. S. Smith. Trans. of AIME. 1958, 212, 574.
8. А. В. Ананьин, А. Н. Дремин, И. И. Канель. ФГВ, 1973, 9, 3, 437.
9. Дж. Дювал.— В сб.: Физика высоких плотностей энергий. М., «Мир», 1974.
10. М. М. Бойко, В. А. Летагин, В. С. Соловьев. ПМТФ, 1972, 2, 101.
11. К. И. Козорезов, Н. Ф. Скугорова. Физика и химия обработки материалов, 1969, 2, 99.
12. Э. С. Атрощенко, Р. О. Пашков, И. М. Рядинская. ФММ, 1965, 19, 6, 923.