

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОИСКАЖЕНИЙ В ГЦК-МЕТАЛЛАХ ПОСЛЕ НАГРУЖЕНИЯ ПЛОСКИМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Г. С. Тесленко

В настоящей работе исследовалось затухание внутренних микроискажений в сравнении со спадом микротвердости в глубь металла после прохождения плоской ударной волны от контактного взрыва. Внутренние микроискажения определялись рентгеновским способом по уширению дифракционных максимумов.

Для исследования были взяты металлы технической чистоты с ГЦК-структурой, различные по прочностным характеристикам и по энергии дефекта упаковки: никель, медь и латунь Л70. Нагружение образцов плоскими ударными волнами проводилось по схеме, приведенной в [1]. Стопка из нескольких плотно приполированных друг к другу образцов диаметром 20 мм общей высотой 60—70 мм помещалась в массивную стальную обойму и накрывалась пластиной из материала образцов толщиной 5 мм. В качестве ВВ брался литой тротил-гексоген 50/50, гексоген или аммонит; высота заряда во всех случаях 14 мм. Плоская ударная волна инициировалась в случае заряда ТГ генератором из ТГ и гексогена, описанным в [2]. При использовании заряда из гексогена или аммонита инициирование проводилось аналогичным генератором из гексогена и аммонита.

Поскольку во всех случаях использовалась только центральная часть образцов, а диаметр заряда был 56 мм, то можно считать, что до глубины 25 мм фронт ударной волны не искажался боковой разгрузкой. Однако следует отметить, что на глубине 25—30 мм, где разгрузка с боковой поверхности должна достигать центра, не наблюдалось резких изменений, изломов на кривых микротвердости и уширения рентгеновских линий (рис. 1, 2). По-видимому, давление на фронте ударной волны при движении ее в глубь образца определяется в основном разгрузкой с поверхности нагружения.

Образцы до эксперимента отжигались в вакууме в течение одного часа, медные и латунные — при температуре 350°C, никелевые — при 450°C. После нагружения убиралась обойма и стравливался поверхностный слой образца ~ 0,2 мм для устранения влияния механической полировки на уширение рентгеновских дифракционных линий. Осадка верхних образцов не превышала 7%, более глубоко расположенные образцы по высоте практически не изменялись.

Микротвердость измерялась при нагрузке 50 г как среднее значение из 30—40 уколов на каждой данной глубине.

Рентгеновская съемка проводилась на аппарате ДРОН-1 в FeK_α -излучении. На никелевых образцах фиксировались линии (111) и (222). На медных и латунных образцах линия (222) была слишком слабой и размытой, поэтому были использованы линии (111) и (311). Профиль дифракционной линии записывался со скоростью поворота счетчика 1/8 град/мин для линий в малых углах и со скоростью 1/4 град/мин для линий в больших углах. Ширина линии определялась как среднее из 6—10 замеров на каждой глубине. Физическое уширение линий β определялось по методу аппроксимации [3]. Распределение интенсивности дифракционных линий для меди, латуни и никеля наиболее хорошо описывается аппроксимирующей функцией e^{-kx^2} .

В работе используются кривые затухания плоских ударных волн контактного взрыва для меди и никеля от зарядов ТГ и гексогена, рассчитанные Г. Е. Кузьминым по методике [4].

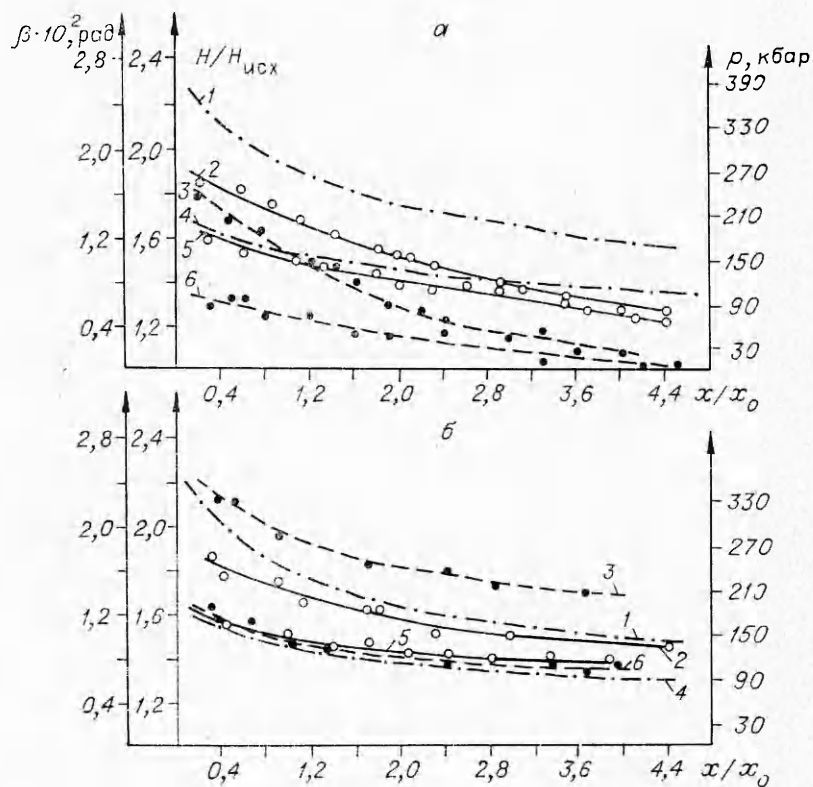


Рис. 1. Изменение расчетного давления и характеристик структуры никеля (а) и меди (б) с глубиной.
 1-3 — нагружение ТГ 50/50; 4-6 — нагружение гексогеном; 1, 4 — расчетное давление;
 2, 5 — физическое уширение линий β ; 3, 6 — упрочнение $H/H_{исх}$.

На рис. 1, а приведены расчетные кривые затухания давления на фронте ударной волны от зарядов ТГ и гексогена для никеля, а также экспериментальные кривые спада микротвердости и физического уширения линий с глубиной (x — глубина, x_0 — толщина заряда ВВ). Видно плавное постепенное уменьшение структурных характеристик металла с глубиной. Отсутствуют резкие изломы кривых микротвердости и уширения рентгеновских линий, отмеченные в [1] для малоуглеродистой стали и отнесенные к обратимому фазовому переходу в железе.

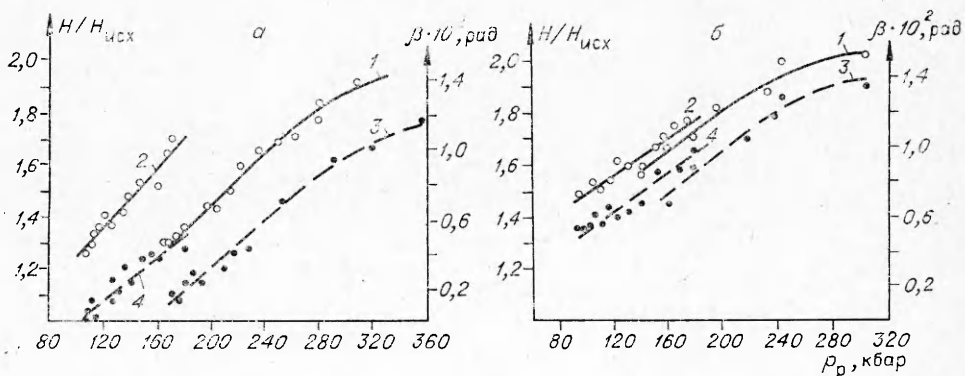


Рис. 2. Зависимость характеристик структуры никеля (а) и меди (б) от расчетного давления.
 1, 3 — нагружение ТГ 50/50; 2, 4 — нагружение гексогеном; 1, 2 — физическое уширение линий β ,
 3, 4 — упрочнение $H/H_{исх}$.

На рис. 2, *a, б* представлены кривые изменения тех же характеристик материала в зависимости от расчетного давления p_r для никеля и меди соответственно. Видно, что микротвердость и физическое уширение изменяются линейно с давлением. На начальном участке (давление выше 290 кбар для Ni и 250 кбар для Cu), по-видимому, происходит частичный отжиг дефектов из-за большого количества выделяющегося тепла в ударной волне. Следует, однако, отметить, что микротвердость и микроискажения решетки зависят и от длительности импульса давления.

Был проведен опыт с нагружением Ni по аналогичной схеме с зарядом гексогена толщиной 30 мм. При увеличении длительности импульса давления вдвое физическое уширение линий и микротвердость увеличились примерно на 20%. Поэтому нужно сравнивать эффекты от различных по величине импульсов давления лишь при приблизительно одинаковой их длительности. Из рис. 2 видно также, что экспериментальная прямая для нагружения гексогеном не продолжает прямую опыта с зарядом ТГ, а располагается левее. Это, по-видимому, следует объяснить тем, что ударная волна достигает нижних образцов с давлением значительно меньшим, чем рассчитанное.

Поскольку расчет затухания давления велся по газодинамической схеме без учета диссипации энергии в металле, то можно предположить, что эти потери обусловлены диссипативными процессами, в частности созданием в металле дефектной структуры. Если принять, что при данной схеме нагружения равные давления вызывают одинаковое упрочнение и уширение рентгеновских линий, то можно оценить это дополнительное затухание давления в наших опытах. Очевидно, что верхние точки прямой, относящейся к опыту с гексогеном, дают значение упрочнения и уширения при давлении, действительно равном расчетному, так как затухание здесь еще мало. Проведя горизонтальную прямую до экспериментальной кривой для опыта с ТГ, можно определить, при каком расчетном давлении действительное давление равно созданному гексогеном.

Следовательно, расстояние по горизонтали между экспериментальными кривыми для опытов с ТГ и гексогеном может служить мерой потерь на диссипацию. Так, для никеля верхние точки кривой для опыта с гексогеном относятся к давлению 170 кбар, а такое же упрочнение и уширение на кривой для опыта с ТГ соответствует расчетному давлению 220—240 кбар. Можно считать, что в действительности в этой точке давление было равно 170 кбар, а разность в 50—70 кбар отнесем к потерям на диссипацию. Отметим, что эта точка (220—240 кбар) приходится на глубину $x/x_0 = 1,5 \div 2$, т. е. $x = 21 \div 28$ мм (см. рис. 1, *a*). Следовательно, эти потери нельзя отнести и к боковой разгрузке, которая приходит в центр на глубине 25—30 мм.

Аналогичные рассуждения для меди дают меньшие потери (10—15 кбар). В то же время видно, что на рис. 2 кривые упрочнения и уширения рентгеновских линий для Cu расположены выше аналогичных кривых для никеля, т. е. одинаковые давления создают в меди большие искажения, чем в никеле. Это согласуется с наблюдениями многих авторов [5]. Тот факт, что кривые для меди идут выше соответствующих кривых для никеля, согласуется с нашим выводом о меньшем диссипативном затухании в меди.

В опытах с нагружением плоскими ударными волнами в условиях, когда отсутствует существенная макродеформация образцов, получено, что для всех исследованных металлов отношение физического уширения рентгеновских линий в малых и больших углах приблизительно равно отношению тангенсов углов дифракции. Этот факт, согласно [6], говорит о том, что при данном способе нагружения получающиеся распределения дислокаций близки к хаотическим. Электронно-микроскопические

наблюдения никеля и меди после нагружения ударными волнами [7, 8] показывают наличие в них ячеистой структуры, которая в никеле проявляется отчетливее, чем в меди, однако даже в ударно-нагруженном никеле ячеистая структура выражена нечетко, ячейки, очень мелкие, в отличие от статической деформации, и разность плотности дислокаций внутри ячейки и на ее границе мала. По-видимому, такая ячеистая структура при дифракции рентгеновских лучей не дает эффектов блочности, для которых нужно присутствие сравнительно большеугловых границ между блоками.

Об отсутствии большеугловых границ в ударно-нагруженном никеле говорит и отмеченный в [9] факт, что температура начала рекристаллизации значительно выше для образцов, упрочненных взрывом, чем для образцов той же твердости, упрочненных обычной пластической деформацией. Настоящие опыты с отжигом меди также дали температуру начала рекристаллизации ударно-нагруженных образцов на 70° выше, чем прокатанных и имеющих ту же твердость.

Из рис. 1, 2 видно, что кривые изменения микротвердости и физического уширения линий, которое в данном случае пропорционально величине микроискажений $\Delta a/a$ (a — параметр решетки), подобны. Сделана попытка установить корреляцию этих величин (рис. 3). Для никеля, меди и латуни Л70 точки, соответствующие взрывным опытам, ложатся с некоторым разбросом на прямые линии. Характерно, что экстраполяция этих прямых к $H/H_{исх}=1$ дают $\beta \neq 0$, т. е. при достаточно слабом ударном воздействии должны быть состояния, когда твердость близка или равна исходной, а ширина рентгеновских дифракционных линий заметно больше исходной. Правда, только для никеля удалось получить точки, лежащие довольно близко к оси абсцисс; для меди, а также латуни Л70, нагруженной ударными волнами от гексогена и аммонита, нижние экспериментальные точки характеризуют еще довольно большие значения $H/H_{исх}$ и β . По-видимому, следует ожидать, что при нагружении слабыми ударными волнами кривая зависимости $H/H_{исх}$ от β будет стремиться к нулю.

Для сравнения были проведены опыты со статической деформацией образцов из этих же материалов путем холодной прокатки на ручных валах с осадкой по высоте 2, 5, 10, 20 и 40% с последующим изме-

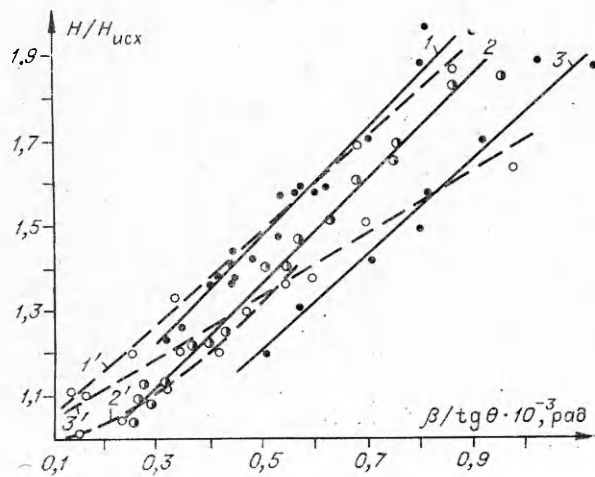


Рис. 3. Соотношение между упрочнением $H/H_{исх}$ и уширением рентгеновских линий $\beta/\text{tg } \theta$ (θ — угол дифракции) для динамически нагруженных (1, 2, 3) и статически деформированных (1', 2', 3') образцов из меди (1, 1'), никеля (2, 2') и латуни Л70 (3, 3').

рением упрочнения и уширения рентгеновских линий. Зависимость $H/H_{исх}$ от β для статически деформированных никеля, меди и латуни также показана на рис. 3. Видно, что «статические» кривые идут более полого, причем разница между соответствующими «статическими» и «динамическими» кривыми, наименьшая для никеля, возрастает для меди и максимальна для латуни. В этом же порядке для данных металлов убывает энергия дефекта упаковки, которая характеризует склон-

ность к двойникованию. При увеличении скорости деформации вероятность деформации двойникованием выше. Поэтому разницу между «динамическими» и «статическими» кривыми, по-видимому, надо объяснить тем, что при нагружении достаточно сильными ударными волнами особенно быстро растет количество двойникующих дислокаций и дефектов упаковки двойникового типа. Последние слабо искажают решетку в окрестности дефекта, но являются достаточно сильным препятствием для скользящих дислокаций, а поэтому сильнее увеличивают твердость, чем физическое уширение линий, благодаря чему зависимость $H/H_{исх}$ от β идет круче. При слабых ударных волнах, когда следует ожидать более пологий ход «динамических» кривых в области малых упрочнений, возможно, более заметной становится роль точечных дефектов, образующихся при ударном нагружении в значительно большем количестве, чем при статической деформации [10].

Таким образом, в работе установлено, что затухание ударных волн при прохождении их через ГЦК-металлы происходит значительно быстрее, чем это предсказывает газодинамическая схема. Такой же вывод для ОЦК-железа сделан в работе [1] на основании экспериментальных данных и в работе [11] на основании теоретического анализа, численного счета и другой методики эксперимента с ударными волнами и упрочнением железа.

Показано также, что отличие «динамического» и «статического» соотношений упрочнения и физического уширения линий тем больше, чем меньше величина энергии дефекта упаковки металла. Рентгеновский анализ угловой зависимости уширения дифракционных линий позволяет сделать вывод о близком к хаотическому распределении дефектов в решетке металлов, нагруженных плоскими ударными волнами.

*Институт гидродинамики СО АН СССР,
Новосибирск*

*Поступила в редакцию
16/1 1976*

ЛИТЕРАТУРА

1. Т. С. Тесленко. ФГВ, 1976, 12, 1.
2. В. А. Симонов. Канд. дис., ИГ СО АН СССР. Новосибирск, 1972.
3. С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М., «Металлургия», 1970.
4. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
5. S. Mahajan. Phys. Status solidi (a), 1970, 2, 2, 187.
6. М. А. Кривоглаз, К. П. Рябошанка. ФММ, 1933, 15, 1, 18.
7. J. Trueb. J. Appl. Phys., 1969, 40, 7.
8. F. J. Grase, M. C. Inman. Metallography, 1970, 3, 1, 89.
9. В. Н. Сикоров, С. В. Першин. ФГВ, 1974, 10, 3.
10. М. А. Могилевский. Канд. дис., ИГ СО АН СССР, Новосибирск, 1970.
11. S. S. Grigorjan, K. I. Kozorezov, a. o. Astronautica Acta, 1972, 17, 4, 405.

О ВТОРИЧНОМ РОСТЕ ДОННОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ ЗА ОСЕСИММЕТРИЧНЫМ ТЕЛОМ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

*В. К. Баев, С. А. Вуйтицкий, А. Ф. Гаранин,
П. К. Третьяков, В. А. Ясаков*

Проблема течения за телами с донным срезом давно привлекает исследователей. Одна из сторон этой проблемы — исследование возможности снижения общего сопротивления тела. Дело в том, что значитель-