

27—42%, хотя значения v_1 резко падают, и при $d_{\text{ВВ}}=31$ мм составляет всего 0,3 км/с. Это указывает на независимость ϵ от v_1 по крайней мере в интервале $v_1=0,3\div 1,4$ км/с.

Заметного различия в величинах ϵ Ст. 3 и ЗОХГСА различной термообработки не обнаружено, хотя при испытании в статических условиях величины относительных удлинений Ст. 3 составляют 21—27% и ЗОХГСА — 10%.

Величина ϵ сплава АМЦМ по мере увеличения толщины стенки труб с 1 до 12 мм возрастает с 55—70 до 160%, а для сплава Д16АТ, подвергнутого закалке, составляет 60 и 76% (при δ соответственно 6 и 12 мм). Видно, что для алюминиевых сплавов ϵ существенно зависит от исходных характеристик материала. Значения относительных удлинений при статических испытаниях для АМЦМ составляют 20% и для Д16АТ — 8—12%.

5. Как следует из таблицы, скорость v_2 факелов ПВ в опытах со стальными трубами примерно в 2 раза превышала v_1 , а в опытах с трубами из сплавов алюминия $v_2=1,4 v_1$. При использовании труб из пластиков v_2 , с точностью до ошибки регистрации, совпала с v_1 . Такая закономерность объясняется уменьшением давления в ПВ к моменту времени t_2 и падением v_2 , а также одновременным ростом v_1 (при тех же δ). Меньшие давления в ПВ у более легких труб есть следствие существенного увеличения объема трубы из-за деформаций к моменту t_2 .

Поступила в редакцию
25/VII 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.
2. А. Целминьш. Прикладная механика, 1969, 36, сер. Е, 2.
3. H o g g a t t R e c h t. J. Appl. Phys., 1968, 39, 3.
4. К. Б. Абрамова, Н. А. Златин. Докл. АН СССР, 1971, 201, 6.
5. Я. Б. Зельдович, С. Б. Кормер и др. Докл. АН СССР, 1958, 122, 1.

УДК 621.787.044

ВЗРЫВНОЕ УПРОЧНЕНИЕ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ ФРОНТА ДЕТОНАЦИИ

А. Г. Тесленко, Р. П. Дидык, Л. В. Грязнова, В. Н. Легеза

(Днепропетровск)

В настоящее время метод упрочнения металлов взрывом находит все большее применение. Различие в эффекте упрочнения металлов при контактном взрыве заряда взрывчатого вещества (ВВ) связано с начальными параметрами на границе раздела ВВ — металл, которые определяются прежде всего типом ВВ и углом встречи детонационной волны с преградой.

Сравнение результатов упрочнения косыми и плоскими ударными волнами [1] показало, что при одном и том же давлении на фронте волны глубина упрочненной зоны при косых волнах существенно больше, чем при плоских. Изучение упрочнения в этих волнах представляет теоретический и практический интерес.

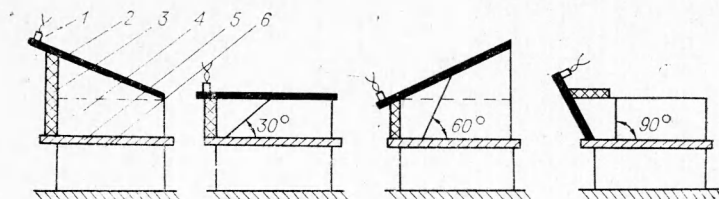


Рис. 1. Монтажные схемы упрочнения Ст. 3 наклонной детонационной волной.

1 — капсюль-детонатор; 2 — инициирующий слой ВВ; 3 — инертная среда; 4 — основной заряд ВВ; 5 — образец; 6 — свинцовый крешер.

Целью настоящей работы является расчет начальных параметров ударных волн на границе раздела ВВ — металл, генерируемых детонационными волнами в диапазоне углов удара $\beta = 0-90^\circ$.

Возможность широкой вариации углов падения детонационного фронта достигалась при использовании комбинированных зарядов ВВ, составы которых резко отличаются по своим физико-химическим свойствам. В качестве таких составов были использованы заряды аммонита 6ЖВ (начальная плотность $\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$, скорость детонации $D = 4690 \text{ м/с}$) и элластика ($\rho = 1,65 \text{ г/см}^3$, $D = 7750 \text{ м/с}$), толщиной $\delta = 1 \text{ мм}$.

Влияние наклонного падения детонационной волны в зарядах аммонита 6ЖВ на упрочнение малоуглеродистой стали изучалось на плоских образцах размером $110 \times 60 \times 4 \text{ мм}$. Пластины размещались на большей грани блока-крешера из рафинированного свинца с размером $100 \times 50 \times 50 \text{ мм}$, по обжатию которого качественно оценивалась величина импульса при различных углах удара [2]. Крешер располагался на массивном металлическом основании.

Положение фронта детонации в заряде аммонита определялось углом к поверхности преграды, который зависит от взаимного расположения зарядов друг к другу (рис. 1). Устойчивость косоугольного фронта детонации в зарядах 6ЖВ различной высоты ($h_A = 20, 40 \text{ и } 80 \text{ мм}$) исследовалась в отдельной серии опытов с помощью СФР-2л [3]. Как показали многочисленные опыты, угол наклона фронта детонации к плоскости раздела зарядов в аммонитах 6ЖВ постоянный ($\gamma = 37^\circ$) и не зависит от толщины инициирующего слоя ВВ.

Упрочнение проводилось косою детонационной волной при углах $\beta = 0, 30, 60 \text{ и } 90^\circ$ и разной высоте основного заряда $h_A = 20, 40 \text{ и } 80 \text{ мм}$.

Для численных расчетов начальных параметров ударных волн и стали был использован метод построения отдельных ударных поля в координатах давление — отклонение линии тока ($p - \theta$) для всех возможных режимов взаимодействия детонационной волны с преградой: регулярного нерегулярного (маховского) отражения и разлета Прандтля — Мейера [4, 5]. Состояние продуктов взрыва аммонита 6ЖВ при сжатии и в изэнтропической волне расширения описываются известным уравнением [6].

$$p = A\rho^n,$$

где A — постоянная взрывчатого вещества; $n \approx 2$ — показатель адиабаты.

Уравнение состояния малоуглеродистой стали мало чем отличается от уравнения состояния железа и принималось таким, как в работе [4]. Используя условие равенства давления и направления линий тока для продуктов взрыва и металла на границе их раздела путем наложения ударных поля, определена зависимость давления от угла встречи детонационной волны с поверхностью стали $p(\beta)$ (рис. 2). Расчет может давать заниженные результаты, вследствие влияния химика при детонации аммиачно-селитренных ВВ [2].

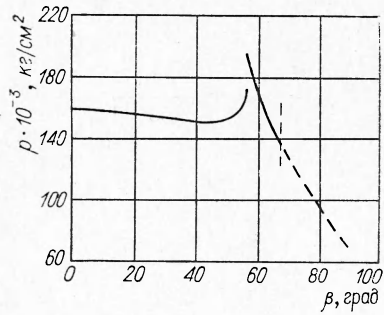


Рис. 2. Зависимость давления на границе раздела ВВ-сталь от угла удара детонационной волны.

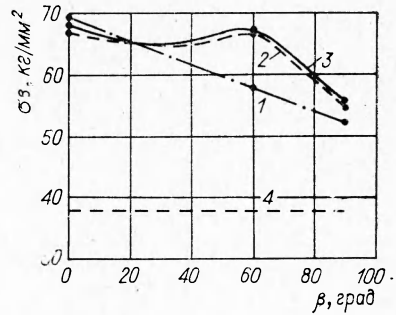


Рис. 3. Зависимость предела прочности Ст. 3 от угла удара детонационной волны. 1 — $h_A = 20$ мм; 2 — $h_A = 40$ мм; 3 — $h_A = 80$ мм; 4 — исходные значения предела прочности.

Расчитанное значение давления при $\beta = 0^\circ$ (плоский удар) хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными в работе [6]. Левая часть зависимости $p(\beta)$ соответствует регулярному отражению ударной волны в продуктах детонации от поверхности удара. При этом давление в диапазоне углов $0 \leq \beta \leq 50^\circ$ меняется незначительно. При $\beta = 56^\circ$ давление возрастает скачкообразно от 174 до 196 тыс. атм. Правая часть зависимости $p(\beta)$ соответствует нерегулярному отражению в продуктах детонации.

Следует отметить, что в диапазоне углов $0 \leq \beta \leq 66^\circ 48'$ имеет место двухволновая структура ударной волны в стали, обусловленная наличием точки излома на адиабате Гюгонио при давлении 130 тыс. атм.

Как показали расчеты, угол наклона упругой и пластической ударных волн в стали к поверхности удара различен вследствие их различной скорости движения и зависит от угла удара β детонационной волны (см. таблицу).

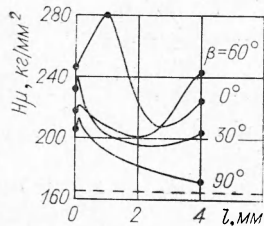


Рис. 4. Изменение микротвердости по глубине образца в зависимости от угла падения фронта детонационной волны. (l — расстояние от контактной поверхности).

При $\beta = 66^\circ 48'$ скорость точки удара $D/\sin \beta$ становится близкой к скорости звука в металле. С увеличением угла β ($\beta \geq 66^\circ 48'$) скорость точки контакта становится меньше скорости звука и создаются условия для образования пластических деформаций, охватывающих значительный объем металла, прилегающего к поверхности удара [1]. Давления в интервале $66^\circ 48' \leq \beta \leq 90^\circ$ определялись в акустическом приближении. Этот отрезок кривой на рис. 2 изображен штрихом.

Изменения механических свойств, микротвердости и микроструктуры являлись в опытах основными характеристиками упрочнения. Результаты механических испытаний образцов, упрочненных косою детонационной волной при различных β и разной высоте заряда аммонита 6ЖВ, приведены на рис. 3. Анализ полученных результатов показывает, что наибольшее упрочнение наблюдается при $\beta = 0^\circ$ для всех значений высоты заряда аммонита. Повышение предела прочности наблюдается при $\beta = 60^\circ$ для всех $h_A \geq 40$ мм. Наименьшие значения механических свойств получены при $\beta = 90^\circ$. В диапазоне $45^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ более очевидна зависимость между высотой заряда и упрочнением, чем при $0^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$, что, по-видимому, связано с характе-

Угол удара, град	Угол наклона	
	упругая волна	пластическая волна
0	0°	0°
30	$33^\circ 41'$	$19^\circ 54'$
60	$76^\circ 30'$	$32^\circ 48'$
90	90°	34°

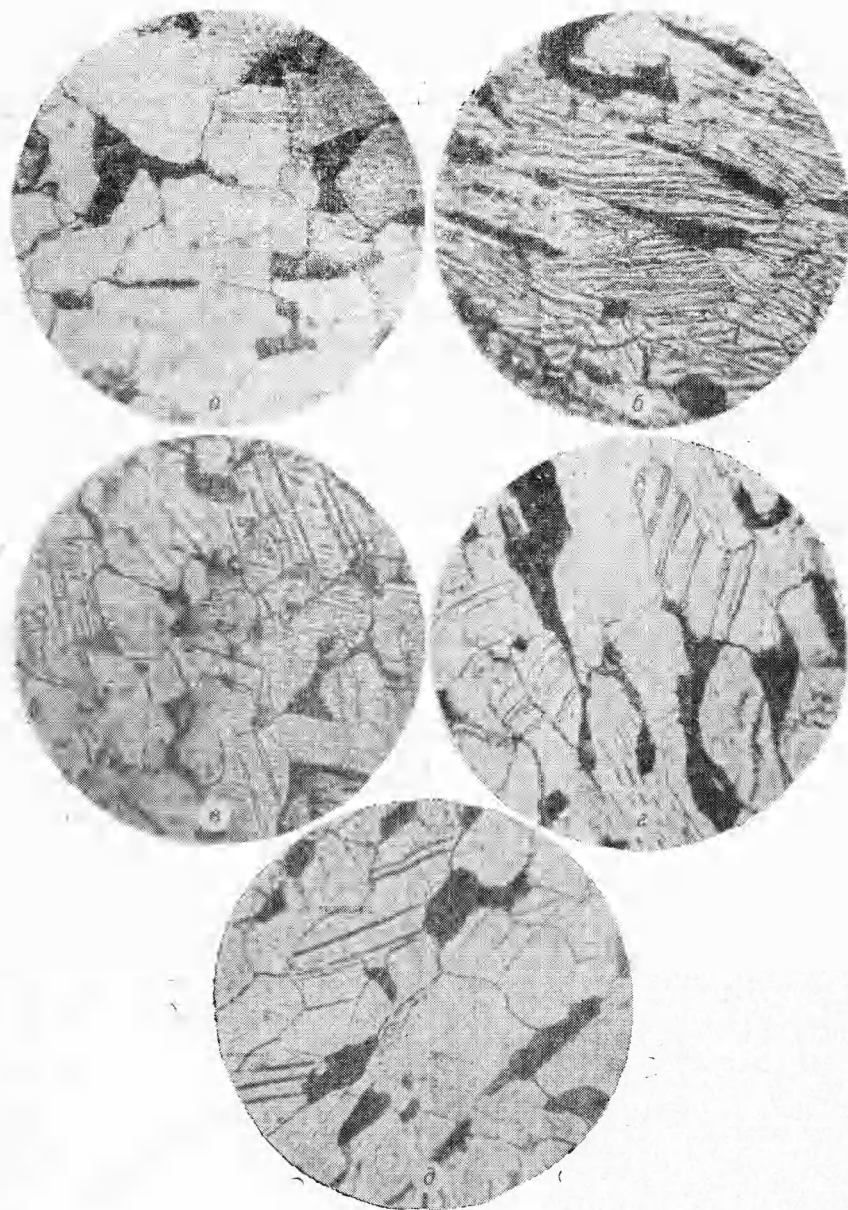


Рис. 5. Структурные изменения Ст. 3 в зависимости от схемы нагружения при $h_A = 40$ мм.

ром изменения давления на границе раздела ВВ — металл (см. рис. 2) и с величиной импульса.

Следует отметить, что пластические характеристики также зависят от угла падения фронта детонации. Так, с ростом β от 0 до 90° для всех h_λ значения относительного удлинения увеличиваются с 9,25 до 14,8% при исходном значении 18,13%.

Характер изменения твердости по глубине при $h_\lambda = 40$ мм для различных углов удара представлен на рис. 4. Увеличение твердости при $\beta = 0^\circ$ обнаруживается на некотором расстоянии от поверхности удара. При этом ширина зоны наибольшей твердости увеличивается с ростом высоты заряда, что связано, по-видимому, со временем действия давления.

Следует подчеркнуть, что с увеличением угла удара пик твердости уменьшается, а зона, соответствующая ему, приближается к поверхности при всех значениях высоты заряда аммонита. По-видимому, это можно объяснить ослаблением влияния химпика при увеличении β .

При $\beta = 90^\circ$ твердость незначительно повышается возле поверхности на небольшой глубине (0,3 мм), а затем понижается до исходной. Таким образом, рост высоты заряда ведет к увеличению зоны повышенной твердости для углов, близких к нулю; при высоте заряда 20 мм ширина зоны равна 0,5—1 мм, для заряда высотой 40 мм — 1,5—2 мм. Изменения структуры Ст. 3 приведены на рис. 5 (*a* — исходная структура). При $\beta = 0^\circ$ (рис. 5, *b*) наблюдается сильно развитый процесс двойникования во всем объеме металла, вытянутость зерен. По нашим расчетам, при $\beta = 0^\circ$, $p = 160$ тыс. атм (см. рис. 2).

При $\beta = 60^\circ$ (рис. 5, *г*) деформация протекает менее интенсивно, плотность двойников и число зерен феррита, охваченных двойникованием, понижаются. При $\beta = 30^\circ$ (рис. 5, *в*) и 90° (рис. 5, *д*) вид структуры меняется. Это, по-видимому, связано с изменением угла наклона упругой и пластической ударных волн к поверхности упрочнения.

Изменения в структуре после воздействия скользящей детонационной волной ($\beta = 90^\circ$) совпадают с данными, полученными в работах [1, 7]. В малоуглеродистой стали при $p \leq 130$ кбар отсутствует состояние ударного сжатия в обычном смысле слова. Ударная волна вырождается в звуковую уже при $\beta = 66^\circ 48'$.

Теоретические предпосылки при определении давления на границе раздела в нашем случае не позволяют обнаружить пластические волны при $\beta = 66^\circ 48'$, которые могут приводить к упрочнению.

*Поступила в редакцию
23/IV 1973*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас, В. М. Кудинов, Т. М. Соболенко. ФГВ, 1967, 3, 3.
2. П. Ф. Похил, М. А. Садовский. Сб. «Физика взрыва». Изд. АН СССР, 1952.
3. Р. П. Дидык, А. Г. Тесленко и др. Сб. «Гидродинамика, твердое тело». Днепропетровск, 1971.
4. H. M. Sternberg, D. Placesi. The Physics of Fluids, 1966, 9, 7, 1307.
5. D. Bancroft, E. Peterson, S. Minshall. Appl. Phys., 1956, 27, 3, 291.
6. А. Н. Дремин, К. К. Шведов и др. Сборник статей III сессии научного совета по народнохозяйственному использованию взрыва. Днепропетровск, 1969.
7. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.