

3. Определена эффективность преобразования химической энергии взрыва газовой смеси в акустическую энергию в широком диапазоне изменения начальных параметров взрыва.

В заключение авторы благодарят Э. И. Андрианкина за полезное обсуждение результатов работы.

Поступила в редакцию  
5/XI 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Евдокимов, Б. Л. Каплани др. Докл. АН СССР, 1962, 143, 5.
2. М. И. Балашканди др. В сб. Разведочная геофизика, вып. 15. М., «Недра», 1966.
3. М. И. Балашканди др. В сб. Состояние и задачи разведочной геофизики. М., «Недра», 1970.
4. C. Leroу, D. Parkes, E. Sigovich. J. Acoust. Soc. Amer., 1963, 35, 2.
5. А. В. Любимов. Канд. дис., ИХФ АН СССР, 1966.
6. К. А. Наугольных, Н. А. Рой. Электрические разряды в воде. М., «Наука», 1971.
7. Р. Коул. Подводные взрывы. М., ИЛ, 1950.
8. К. П. Станюкович. Неустановившиеся движения сплошной среды. М., «Наука», 1971.
9. J. Keller, J. Kolodner. J. Appl. Phys., 1956, 27, 10.
10. В. М. Любошиц, В. Е. Первушин. МЖГ, 1971, 2.
11. L. Neuckrott, I. Glass. Phys. Fluids, 1968, 11, 10.
12. Б. Д. Христофоров. ПМТФ, 1960, 2.
13. A. Arons, D. Yennie. Rev. Mod. Phys., 1948, 20, 3.
14. Г. Биркгоф. Гидродинамика. М., ИЛ, 1963.

УДК 534.211—16 : 539.3

#### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН С КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЕЙ СОУДАРЯЮЩИХСЯ ТЕЛ

*М. С. Качан, Ю. В. Киселев, Ю. А. Тришин*

*(Новосибирск)*

Ударные волны, возникающие в результате соударения двух пластин при сварке взрывом, оказывают существенное влияние на качество сварного соединения, особенно в случае применения для сварки взрывом высокобризантных взрывчатых веществ типа ТГ 50/50. Известно, что при сварке взрывом часто применяется инертная прокладка между взрывчатым веществом и метаемой пластиной. Ее наличие объясняют необходимостью защиты поверхности пластины от действия продуктов детонации [1]. Ниже показано, что при определенных условиях прокладка оказывает решающее воздействие на прочность сварного соединения.

Предлагаемая одномерная схема соударения, естественно, не может привести к сварке, которая осуществляется только при косых соударениях. Однако ударно-волновая картина, возникающая в одномерной модели, может объяснить ряд процессов и при косых соударениях, в частности явления, сопутствующие сварке взрывом. Очевидно, что с большой точностью одномерная схема соударения может быть применена при углах соударения, меньших или равных критическим [2]. В случае же, когда угол соударения несколько превышает критический, она, по-видимому, также достаточно близко описывает процесс косых соударений.

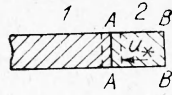


Рис. 1. Схема соударения.  
1 — мишень; 2 — ударник.

Рассмотрим в одномерной постановке задачу о взаимодействии ударных волн, образующихся при соударении свариваемых пластин, со свободными поверхностями и контактными разрывами.

Обозначим индексом 1 параметры, характеризующие неподвижную преграду (мишень), индексом 2 — налетающую со скоростью  $u_*$  пластину (ударник) (рис. 1).

Пусть до соударения неподвижная полубесконечная преграда имеет параметры  $\rho_1, c_1, u_1=0, p_1=0$ , а налетающая пластина конечной толщины —  $\rho_2, c_2, u_2=u_*, p_2=0$  ( $\rho$  — плотность материала,  $c$  — скорость звука в материале,  $u$  — массовая скорость,  $p$  — давление). При соударении как в мишени, так и в ударнике образуются ударные волны, которые распространяются от поверхности соударения  $AA$  (см. рис. 1) в противоположные стороны. Обозначим скорость движения границы раздела сред  $AA$  через  $u_A$ , а давление в области между фронтами ударных волн через  $p_A$ .

Столкновение пластин удобно рассматривать в координатах  $p, u$ . Начальные состояния покоящейся пластины ( $p=0, u=0$ ) и ударника ( $p=0, u=u_*$ ) изображены точками  $O$  и  $M$  (рис. 2).

1. Будем рассматривать задачу в акустическом приближении  $u_* \ll c_1, c_2$ . Кривая в плоскости переменных  $p, u$ , т. е.  $p, u$ -диаграмма ударных волн с центром  $(u_A, p_A)$  согласно [3] имеет вид

$$(p - p_A)(V_A - V(p)) = (u - u_A)^2, \quad (1)$$

где  $V$  — удельный объем. Для металлов при давлениях  $\sim 100$  кбар часто используют эмпирическое уравнение состояния типа

$$p = B \left[ \left( \frac{V_0}{V} \right)^n - 1 \right], \quad (2)$$

в котором  $n$  и  $B$  считаются постоянными [4]. Постоянные  $n$  и  $B$  связаны между собой соотношением, в которое входит сжимаемость вещества при нормальных условиях (скорость звука)

$$c_0^2 = V_0 B n. \quad (3)$$

Для слабых ударных волн положим

$$\begin{aligned} \frac{V_0}{V} &= 1 + \varepsilon, & \varepsilon &\ll 1, \\ \frac{V_0}{V_A} &= 1 + \varepsilon_A, & \varepsilon_A &\ll 1. \end{aligned} \quad (4)$$

Из уравнений (1) и (2) с учетом (4) следует

$$\frac{(p - p_A)^2}{\left(1 + \frac{p_A}{Bn}\right) \left(1 + \frac{p}{Bn}\right)} = \rho_0^2 c_0^2 (u - u_A)^2. \quad (5)$$

Для металлов  $Bn \gg 1$  Мбар, так что для слабых ударных волн

$$\frac{p_A}{Bn} \ll 1, \quad \frac{p}{Bn} \ll 1. \quad (6)$$

Тогда из соотношения (5)

$$(p - p_A)^2 = \rho_0^2 c_0^2 (u - u_A)^2, \quad (7)$$

что свидетельствует о том, что в приближении (4), (6) ударные адиабаты в плоскости  $p, u$  есть прямые линии (7).

Непосредственно из соотношения (7) видно, что  $p, u$ -диаграмма состоит из двух ветвей, пересекающихся в ее центре под конечным углом, определяемым акустическим сопротивлением материала, и, кроме того, обе ветви симметричны относительно прямых  $u=u_A$  и  $p=p_A$ . Из этого соотношения также следует, что  $-\infty < p < +\infty$ .

Для газов  $p \geq 0$  и реальным смыслом обладает лишь верхняя полуплоскость ( $p, u$ ). В твердых телах, имеющих большую прочность на разрыв, могут появляться растягивающие напряжения ( $\sigma < 0$ ), не приводящие к разрыву сплошности твердого тела. Поэтому считаем, что соотношение (7) справедливо и для нижней полуплоскости переменных  $p, u$  для значений  $|p| \leq |\sigma_{кр}|$ , где  $\sigma_{кр}$  — прочность на разрыв. Тогда в соотношении (4)  $V, V_A$  могут быть как больше, так и меньше  $V_0$ .

Итак, задача определения параметров ударных волн при соударении ударника с мишенью сводится к определению точки пересечения  $A$  прямых  $p_1$  и  $p_2$  (см. рис. 2):

$$p_1 = R_1 u, \quad (8)$$

$$p_2 = R_2 (u_* - u), \quad (9)$$

где  $R_i = \rho_i c_i$  ( $i=1,2$ ). Находим ее координаты

$$u_A = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_*, \quad (10)$$

$$p_A = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} u_*.$$

Интересно сравнить полученные по формуле (10) величины давления при соударении, с расчетами по ударным адиабатам [1] для случая соударения меди со сталью в диапазонах скоростей, часто встречающихся в практике. Как видно из таблицы, эти значения близки для диапазона скоростей от 200 до 800 м/с (разница не превышает 7,5%), что свидетельствует о возможности применения акустического приближения в этом диапазоне скоростей.

Давление	Скорость метания, м/с					
	200	400	600	800	1000	1200
По [1], кбар	35	75	115	160	210	255
$p_A$ по (10), кбар	36,8	73,5	111	148	184	221
$\frac{ p - p_A }{p}, \%$	5,1	2	3,5	7,5	12,4	13,3

2. Рассмотрим случай соударения ударника и мишени, причем

$$R_2 < R_1. \quad (11)$$

После того, как ударная волна с параметрами (10) достигнет свободной поверхности ВВ ударника, по ударнику в сторону контактной поверхности раздела АА пойдет волна разрежения. Состояние за фронтом волны разрежения в ударнике описывается на  $p, u$ -диаграмме точкой  $N$  — пере-

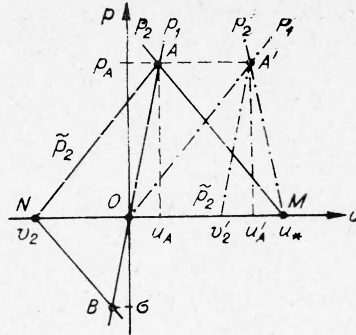


Рис. 2.  $p, u$ -диаграмма соударения ударника с мишенью.

сечение прямой  $p=0$  с прямой  $\tilde{p}_2$ , симметричной ударной адиабате  $\rho_2$  относительно прямой  $u=u_A$ . Таким образом, из соотношения

$$\tilde{p}_2 - p_A = R_2(u - u_A) \quad (12)$$

с учетом соотношений (10) получаем величину массовой скорости в ударнике за фронтом волны разрежения

$$v_2 = -\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} u_* \quad (13)$$

Если учесть условие (11), то из (13) следует, что  $v_2 < 0$ , т. е. ударник, имеющий меньшую акустическую жесткость, чем мишень, отскакивает от мишени при выходе волны разрежения на контактную поверхность  $AA$ . Если же за истекшее время произошла сварка ударника с мишенью, то в момент прихода волны разрежения на поверхность  $AA$  в сварном шве возникают растягивающие напряжения (точка  $B$  на рис. 2)

$$\sigma = -\frac{R_1 \cdot R_2 (R_1 - R_2)}{(R_1 + R_2)^2} \cdot u_* \quad (14)$$

что может привести либо к разрыву сварного соединения, либо к ухудшению его прочности.

Если мишень стальная, а ударник медный, то при скорости соударения  $u_* = 500$  м/с растягивающие напряжения составляют  $\sigma = -6,2$  кбар, если же ударник из дюралюминия, то растягивающие напряжения достигают  $\sigma = -25$  кбар. В случае, когда материал ударника имеет большую, чем мишень, акустическую жесткость, т. е.

$$R_2 > R_1,$$

из (14) следует, что растягивающих усилий в этом случае не возникает ( $\sigma > 0$ ). Соответствующий ход ударных адиабат представлен на рис. 2 штрих-пунктирными линиями.

Этот анализ позволяет сделать важный для практики вывод: для повышения прочности сварного шва необходимо в качестве метаемой пластины при сварке разнородных металлов выбирать такую, у которой акустическая жесткость больше, чем у неподвижной. В частности, при сварке взрывом наиболее трудносвариваемой пары дюралюминий — сталь [1] нами легко было получено сварное соединение, когда метаемая пластинка была стальной, взрывчатым веществом при этом служил аммонит марки 6ЖВ.

Если ударник сделан из материала с меньшей, чем у мишени, акустической жесткостью, то уменьшить растягивающие напряжения в сварном шве можно, как следует из формулы (14), снизив до возможного предела скорость соударения пластин. Этот вывод также подтверждается экспериментами. В [1] для осуществления сварки алюминия (ударник) со сталью режимы процесса подбирались специально: использовались небольшие заряды, и применялись слабобризантные взрывчатые вещества (смесь аммонита с селитрой 50/50).

3. Рассмотрим случай, когда ударник состоит из двух пластин (рис. 3), причем акустическая жесткость пластины 3, являющейся прокладкой между взрывчатым веществом и привариваемой пластиной, меньше акустической жесткости пластины 2  $R_3 < R_2$ . Все остальные па-

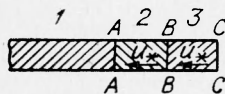


Рис. 3. Схема соударения составного ударника с мишенью.  
1 — мишень; 2, 3 — боек и прокладка составного ударника.

раметры остаются прежними, и скорость соударения  $u_2 = u_3 = u_*$ . До момента выхода ударной волны на поверхность раздела ВВ сред 2 и 3 давления и массовые скорости в средах 1 и 2 одинаковы и описываются формулами (10). При переходе ударной волны из бойка в прокладку состояние за фронтом ударной волны в прокладке давления в бойке описываются и за фронтом волны понижения (рис. 4) точкой В пересечения ударной адиабаты  $p_3$  прокладки и прямой  $\tilde{p}_2$ , симметричной ударной адиабате  $p_2$  бойка относительно прямой  $u = u_A$ .

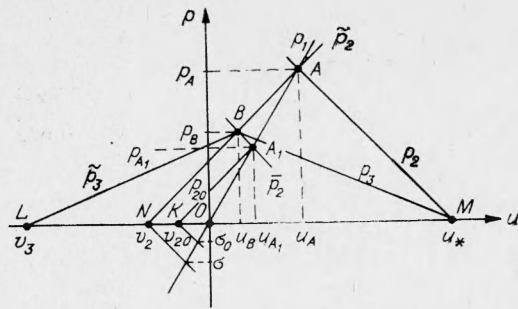


Рис. 4.  $p, u$ -диаграмма соударения составного ударника с мишенью.

Для определения параметров ударной волны в прокладке и волны понижения давления в бойке воспользуемся уравнением для прямой  $\tilde{p}_2$  (12) и уравнением ударной адиабаты прокладки

$$p_3 = R_3(u_* - u),$$

откуда находим давление и массовую скорость

$$p_B = \frac{2R_1R_2R_3}{(R_1 + R_2)(R_2 + R_3)} u_*,$$

$$u_B = \left[ 1 - \frac{2R_1R_2}{(R_1 + R_2)(R_2 + R_3)} \right] u_*.$$

Затем волна понижения давления достигает контактной поверхности АА и образуется волна с параметрами

$$p_{A_1} = \left[ \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} - \frac{2R_1^2R_2(R_2 - R_3)}{(R_1 + R_2)^2(R_2 + R_3)} \right] u_*,$$

$$u_{A_1} = \left[ \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{2R_1R_2(R_2 - R_3)}{(R_1 + R_2)^2(R_2 + R_3)} \right] u_*.$$

Волна разрежения со свободной поверхности СС прокладки, идущая в сторону контактной поверхности раздела ВВ, снимает давление до нуля сначала в прокладке, сообщая ей при этом отрицательную скорость  $v_3$ , а затем в бойке, сообщая ему массовую скорость  $v_{20}$ , меньшую, чем  $v_2$  (см. рис. 4), возникающую в случае отсутствия прокладки. Для простоты анализа волновой картины толщину бойка и прокладки выбираем такую, чтобы волна разрежения от свободной поверхности СС и волна понижения давления (точка  $A_1$ ) приходили одновременно в сечение ВВ, т. е.  $l_2c_3 = l_3c_2$ , где  $l_2$  — толщина бойка,  $l_3$  — толщина прокладки.

Скорость  $v_{20}$ , с которой отскакивает боек при наличии прокладки, определится из уравнения

$$\tilde{p}_{20} - p_{A_1} = R_2(u - u_{A_1})$$

при условии  $\tilde{p}_{20} = 0, u = v_{20}$ .

Отсюда

$$v_{20} = \left[ -\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} + \frac{2R_1(R_1 - R_2)(R_2 - R_3)}{(R_1 + R_2)^2(R_2 + R_3)} \right] u_*. \quad (15)$$

Если мишень стальная, ударник — медный, а прокладка изготовлена из органического стекла, то из рис. 4 легко видеть, что при сварке соударяемых пластин прокладка снижает растягивающие усилия на порядок

$$\frac{\sigma_0}{\sigma} = \frac{v_{20}}{v_2} \approx 0,1.$$

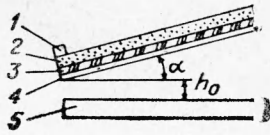


Рис. 5. Схема сварки взрывом.  
1 — капсюль-детонатор; 2 — заряд ВВ (ТГ 50/50); 3 — прокладка из оргстекла; 4 — метаемая пластина; 5 — стальная плита.

Это благоприятствует сохранению сварного шва и улучшению его механических свойств. Заметим, что в случае симметричной схемы сварки взрывом двух пластин наличие инертных прокладок является необходимым условием для образования сварного соединения при небольших углах соударения. Соответствующие формулы легко получить из (14) и (15), положив в них  $R_1 = \infty$ .

Влияние прокладки на прочность сварного соединения было исследовано экспериментально. В качестве неподвижных деталей в экспериментах были использованы плиты из Ст. 3 толщиной 20 мм. Метаемая деталь — пластина размерами  $55 \times 20 \times 5,5$  мм из меди МЗ. Пластина металась газообразными продуктами детонации ВВ (сплав ТГ 50/50), слой которого имел толщину 8 мм, плотность  $1,65 \text{ г/см}^3$  и скорость детонации 7,5 км/с. Заряд инициировался капсюлем-детонатором КД-8 в вершине угла (рис. 5).

Эксперименты проводились в двух вариантах: в первом случае между взрывчатым веществом и медной пластиной имелась прокладка из органического стекла толщиной 3 мм, во втором — она отсутствовала. В экспериментах выявлялась зависимость прочности сварного соединения от начального угла  $\alpha$  соударения. Поскольку скорость детонации — конечная величина, метаемая пластина поворачивается от невозмущенного положения на некоторый угол  $\beta$  и соударение с неподвижной деталью происходит под углом.

$$\gamma = \alpha + \beta. \quad (16)$$

Согласно [1], для практических расчетов можно пользоваться зависимостью  $\beta(r)$ , дающей хорошее совпадение с экспериментом

$$\beta = 2,4 \arcsin \frac{\sqrt{1 + \frac{32}{27} r - 1}}{2 \left( \sqrt{1 + \frac{32}{27} r + 1} \right)}, \quad (17)$$

где  $r = \frac{m_0}{m}$ ;  $m_0$  — масса взрывчатого вещества на единицу площади;  $m$  — масса метаемой пластины на единицу площади.

В рассматриваемом случае при метании медной пластины вместе с прокладкой из органического стекла угол  $\beta = 4,52^\circ$ , а при метании только одной медной пластины  $\beta = 4,8^\circ$ . Значит, имея экспериментальную зависимость прочности сварного соединения от начального угла  $\alpha$ , по формулам (16) и (17) легко можно найти зависимость прочности сварного соединения от конечного угла соударения  $\gamma$ .

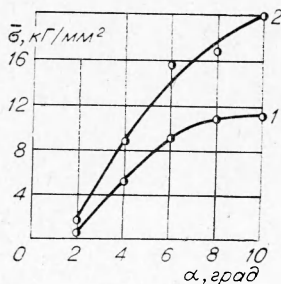


Рис. 6. Зависимость среднего напряжения в сварном соединении от начального угла метания.  
1 — без прокладки; 2 — с прокладкой.

Оценка качества сварного шва проводилась по результатам испытаний его на срез. Из каждого сварного соединения вырезалось по семь образцов  $25 \times 5 \times 5$  мм, которые после шлифовки представляли собой образцы для испытаний. Прочностные характеристики сварного шва определялись на универсальной машине ЦДМ-10 с помощью специально созданного приспособления. Величина  $\bar{\sigma}$  являлась средним арифметическим напряжений среза  $\sigma_i$  всех семи образцов сварного соединения.

Результаты экспериментов приведены на рис. 6. Из графика видно, что  $\bar{\sigma}$  с увеличением начального угла метания  $\alpha$  среднее напряжение среза  $\bar{\sigma}$  растет и при  $\alpha=10^\circ$  достигает практически максимально возможного значения (при наличии прокладки). Рост  $\bar{\sigma}$  отмечается и при отсутствии прокладки, однако  $\bar{\sigma}$  в этом случае при тех же углах метания в 1,5—2 раза меньше. В отдельных экспериментах и при отсутствии прокладки отмечались высокие значения  $\sigma_i$ , но видимая неустойчивость сварного процесса (отдельные непровары по длине образца в случаях  $\alpha=8^\circ$  и  $10^\circ$ ) существенно снизили  $\bar{\sigma}$ . Наличие прокладки как вытекает из этих экспериментов, оказывает на прочность сварного соединения весьма благоприятное стабилизирующее влияние.

Поступила в редакцию  
17/XII 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
2. J. Walsh, R. Shreffler, E. Willig. J. Appl. Phys., 1954, 24, 3.
3. Л. В. Овсянников. Лекции по основам газовой динамики. Новосибирск, НГУ, 1967.
4. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966.

УДК 539.89 : 546.273+546.39

#### К ВОПРОСУ ОБ ОБРАЗОВАНИИ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

*Т. В. Бавина, О. Н. Бреусов, А. Н. Дремин,  
С. В. Першин  
(Черноголовка)*

Сведения об образовании кубического (сфалеритоподобного) нитрида бора в результате ударного сжатия графитоподобной формы этого соединения достаточно противоречивы. Авторы [1—4] в сохраненных образцах кроме графитоподобной формы обнаруживали только вюртцитоподобную модификацию. По данным [5, 6], нитрид бора после ударного сжатия содержал до 16% кубического нитрида бора, причем его содержание [5] увеличивалось с ростом температуры ударного сжатия. Согласно [7], конечный продукт после очистки от графитоподобной формы состоял почти целиком из кубической модификации и содержал лишь следы вюртцитоподобного нитрида бора. По мнению авторов [7], полученные ими результаты являются следствием особо жестких условий синтеза (сходящиеся ударные волны, температура ударного сжатия не ниже 3200 К), что в соответствии с [8] должно было способствовать образованию кубической модификации.

С целью проверки этого предположения в настоящей работе были получены плотные формы нитрида бора в условиях, описанных в [9]. Технический, хорошо закристаллизованный графитоподобный нитрид бора с пикнометрической плотностью  $2,26 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> (2,26 г/см<sup>3</sup>) помещался в цилиндрическую ампулу сохранения. Плотность набивки с целью по-