

СВАРКА ВЗРЫВОМ

А. А. Дерibas,
В. М. Кудинов, Ф. И. Матвеевков, В. А. Симонов
(Новосибирск)

Рассмотрим физические закономерности, управляющие процессом соединения одинаковых и различных металлических материалов при скоростных соударениях. Эти явления стали особенно привлекать внимание исследователей в течение последнего десятилетия. В настоящее время этот сложный комплекс процессов, сопутствующих соединению при соударениях, принято называть «сваркой взрывом» (explosive welding).

ВОЗНИКНОВЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ СОЕДИНЕНИИ ПРИ СОУДАРЕНИЯХ

По-видимому, все исследователи, наблюдавшие процессы скоростных соударений, так или иначе встречались с явлением полного или частичного соединения соударяемых тел. Весьма большое число подобных наблюдений было сделано, в частности, при исследовании кумулятивных зарядов в 1946—1948 гг. в Киеве, проводившихся группой ученых под руководством М. А. Лаврентьева. В частности, работа над двухслойными кумулятивными конусами из стали и меди привела к получению двухслойного образца, разрез которого приведен на рис. 1. Здесь хорошо видны волны на поверхности раздела двух металлов, являющиеся одним из характернейших признаков сварки взрывом.

Участник этих работ Н. Н. Сытый получал монолитные медные стержни из пучка медных проволок, подвергая его взрывному обжатию.

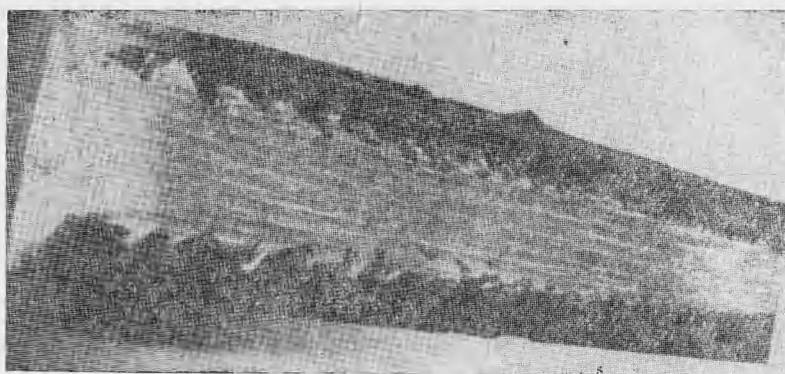


Рис. 1. Образец биметалла сталь+медь.

Фактически им была использована схема сварки взрывом, лишь через 10 лет запатентованная американскими авторами.

Автором термина «сварка взрывом» является американец В. Филипчук [1, 2]. В работе [3], излагая историю возникновения сварки взрывом, он пишет, что в 1957 г. при штамповке взрывом алюминиевой заготовки в стальной матрице U-образного сечения была случайно обнаружена сварка стали с алюминием на площади в 1 квадратный дюйм. В работах [1, 2] была опубликована схема сварки (рис. 2), которая позднее была запатентована [4]. Попытки осуществить сварку по этой схеме, в точности воспроизводя условия рис. 2, не дали положительных результатов. В этой схеме трудно перевести в тепло энергию ударной волны, и, вообще говоря, соединяемые поверхности можно осуществить только в случае если сила, сжимающая соединяемые поверхности, существует достаточно длительное время, чтобы успел развиться процесс диффузии. Однако

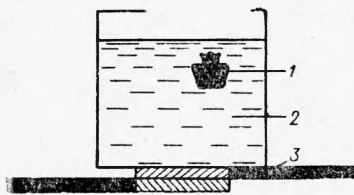


Рис. 2. Схема сварки взрывом [1].

1 — заряд ВВ; 2 — емкость с водой; 3 — свариваемые образцы.

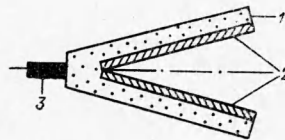


Рис. 3. Схема сварки взрывом [9].

1 — плоский заряд ВВ; 2 — пластины; 3 — дегонатор.

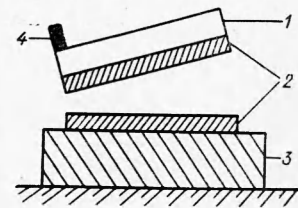


Рис. 4. Схема асимметричного соударения [12, 13].

1 — заряд ВВ; 2 — пластины; 3 — основание; 4 — детонатор.

в этом случае сварка по существу аналогична известному способу сварки давлением. В работе [3] В. Филипчук уточнил свою схему. Он указывает, что поверхности образцов, свариваемых по схеме рис. 2, должны иметь неровности, неплотно прилегать друг к другу. Эта поправка существенно меняет дело, так как при наличии поверхностных неровностей после взрыва развивается пластическая деформация, и энергия взрыва частично рассеивается, необратимо расходуясь на пластическую деформацию. В этой модификации способ Филипчука аналогичен получению монолитного металла из пучка проволок, осуществленному Н. М. Сытым в 1947 г. Модификация этого способа с использованием касательной скорости разрабатывается в Институте металлов в Дельфте (Голландия) [5]. По-видимому, использование способов сварки взрывом на основе схемы рис. 2 может привести к успеху лишь при тщательной очистке соединяемых поверхностей, поскольку здесь не происходит их самоочистения.

В 1960 г. Дугласом, Хольцманом и Кованом [6] была заявлена и в 1964 г. запатентована схема сварки взрывом через металлический порошок, по существу мало отличающаяся от способа Филипчука. В этом патенте имеется ряд весьма интересных соображений о роли скорости детонации, возможности получения многослойных соединений за один подрыв и некоторых других, которые были существенно развиты при дальнейшей работе над сваркой взрывом. Патент [7] является одной из возможных модификаций патента [6], отличающейся от него несущественно.

В работе [8] впервые появилось упоминание о работах Д. Пирсона в Испытательной станции морских орудий США, Чайна Лэйк, Калифорния (U. S. Naval Ordnance Test Station, China Lake, California,

John Pearson). Позднее была опубликована используемая им схема сварки [9] (рис. 3).

Эта схема является по существу плоским вариантом обычного кумулятивного заряда. Биметаллический образец, изображенный на рис. 1, сварен также по схеме кумуляции, с той лишь разницей, что были использованы конические оболочки, в то время как схема Пирсона предполагает использование плоских образцов.

Для объяснения явления кумуляции рядом исследователей была предложена гидродинамическая теория [10, 11], согласно которой металл в этом процессе можно считать идеальной несжимаемой жидкостью, так как давления соударения в десятки раз превосходят предел прочности, а высокие скорости позволяют пренебречь прочностными факторами по сравнению с инерциальными.

При соударении пластин по схеме рис. 3 часть металла с внутренних поверхностей уносится в виде кумулятивной пелены, двигающейся со скоростью несколько километров в секунду (при использовании конических оболочек образуется кумулятивная струя). Основная часть металла образует монолитную биметаллическую пластину, движущуюся в направлении от начала детонации обычно со скоростью несколько десятков метров в секунду.

Использование схемы плоской кумуляции для сварки взрывом в принципе возможно, однако образование плоской кумулятивной пелены на сколько-нибудь значительной площади трудно осуществить из-за неустойчивости такого движения. Малейшая асимметрия в начальных условиях соударения резко изменит режим соударения, как это будет показано ниже при исследовании процесса волнообразования.

В апреле 1961 г. эффект соединения металлов при соударении был получен в Институте гидродинамики Сибирского отделения Академии наук СССР в процессе отработки одной из схем упрочнения металлов взрывом [12] (рис. 4). В июне 1961 г. было опубликовано сообщение о работах Давенпорта и Дювала (D. Davenport, G. Duvall) из Стэнфордского исследовательского института [13], где также использована схема несимметричного соударения.

Эта схема наиболее легко осуществима на практике, поэтому она широко используется в настоящее время в опытном производстве и интенсивно изучается в лабораториях. В дальнейшем изложении будем в основном исследовать именно эту схему.

Работы, проводимые в Институте гидродинамики с 1961 г. по настоящее время, позволяют выделить ряд основных направлений исследований.

1. Проблема метания:

а) выбор энергоносителя (ВВ, взрывающиеся проволочки, высокоскоростные струи) и изучение его свойства (скорость детонации, способы инициирования, процессы распространения фронта детонации);

б) метание тел (лист, пластина, цилиндр) в процессе импульсного нагружения. Вопрос сводится к экспериментальному изучению данного процесса, построению расчетных схем и определению параметров метания (скорость полета, направление полета и др.), а также изучению других явлений, связанных с поведением метаемых тел под действием импульсных нагрузок.

2. Проблема скоростного соударения соединяемых тел:

а) определение параметров соударения (давление при соударении, угол встречи, скорость точки контакта, температура в точке соударения, время соударения);

б) изучение взаимодействия тел при скоростном соударении (ха-

рактер распределения энергии при соударении, вопросы теплообмена в области соударения и др.);

в) изучение явления волнообразования на контактных поверхностях соударяющихся тел с целью создания математической теории данного явления, позволяющей рассчитывать амплитуду, длину и форму волны в зависимости от параметров соударения.

3. Исследование металлофизических процессов, происходящих в металлах при импульсном нагружении:

а) характер и механизм деформации металлов;

б) механизм упрочнения металлов при импульсном нагружении в условиях соударения;

в) явление фазовых переходов в металлах, образования в зоне соударения химических соединений;

г) объяснение механизма соединения металлов в условиях соударения.

4. Использование полученных соединений на практике:

а) исследование механических свойств получаемых соединений;

б) создание различных схем сварки металлов применительно к конкретным задачам;

в) исследование процессов детонации, метания и соударения при изменении геометрического масштаба;

г) создание специальных установок для осуществления процесса (взрывные камеры).

Работа над всем комплексом перечисленных проблем проводилась под научным руководством академика М. А. Лаврентьева.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ПОРОШКООБРАЗНЫХ ВВ В ПЛОСКИХ ЗАРЯДАХ

Скорость детонации порошкообразных ВВ, применяющихся для сварки взрывом, является одним из основных параметров, определяющих процесс соударения. Рассмотрим некоторые особенности детонации плоских зарядов ВВ, имеющие существенное значение при использовании их в различных схемах сварки взрывом.

Выбор типа ВВ. Известно, что бризантное действие ВВ, приводящее к частичному или полному разрушению метаемой пластины при подрыве на ее поверхности заряда ВВ, определяется скоростью детонации ВВ (D) и давлением на фронте детонационной волны (p_D).

Частичное или полное разрушение метаемой пластины при сварке наблюдалось при использовании в качестве заряда таких ВВ, как тротил ($(C_6H_2NO_2)_3CH_3$ ($\rho_0 = 1,52 \div 1,6 \text{ г/см}^3$, $D = 6600 \div 7000 \text{ м/сек}$, $p_D = (17 \div 20) \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$) и сплав тротила с гексогеном ТГ — 50/50 ($\rho_0 = 1,60 \text{ г/см}^3$, $D = 7000 \div 7600 \text{ м/сек}$, $p_D = 20 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$).

Многочисленные эксперименты показали, что использование для сварки насыпных ВВ, таких, как гексоген $C_3H_6O_6N_6$ ($\rho_0 = 1,0 \div 1,2 \text{ г/см}^3$, $D = 6000 \div 6600 \text{ м/сек}$, $p_D = 15 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$), аммониты (аммонийная селитра NH_4N_3 + тротил) ($\rho_0 = 1,0 \div 1,1 \text{ г/см}^3$, $D = 3500 \div 4900 \text{ м/сек}$, $p_D = 12 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$) и смеси аммонита с аммиачной селитрой исключало разрушение метаемой пластины даже при зарядах толщиной $\delta_0 = 100 \div 150 \text{ мм}$.

Насыпные ВВ оказались также и более удобными по сравнению с литыми ВВ. Таким образом, основными видами ВВ, используемыми для сварки взрывом, были порошкообразные ВВ малой плотности.

Методика экспериментов. В работе использовалась стандартная методика, основанная на регистрации фронта детонации с помощью СФР. Запись велась в координатах $S-t$ (путь — время), и скорость развертки составляла $V_{разв} = 1500,92 \text{ м/сек}$ (30000 об/мин). Общий вид схемы эксперимента представлен на рис. 5.

При исследовании зависимости $D=f(\rho_0)$ использовались цилиндрические заряды, помещенные в стеклянные трубки диаметром 30 и длиной 180 мм. Регистрация процессов детонации обеспечивалась системой синхронизации СФР в сочетании со специально изготовленными капсулями — детонаторами.

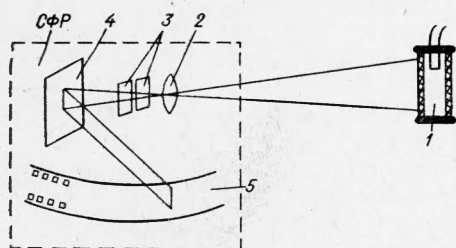


Рис. 5. Схема эксперимента.

1 — цилиндрический заряд насыпного гексогена ВВ; 2 — объектив; 3 — узел щели; 4 — вращающееся зеркало; 5 — фотопленка.

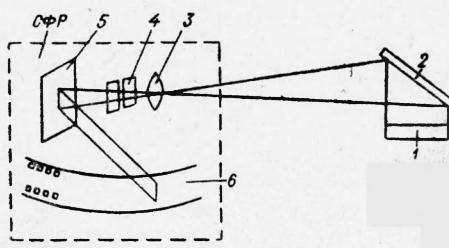


Рис. 6. Схема эксперимента.

1 — плоский заряд ВВ; 2 — зеркало; 3 — объектив; 4 — узел щели; 5 — вращающееся зеркало; 6 — фотопленка.

Учитывая, что при сварке металлов взрывом использовались плоские заряды насыпного ВВ различной толщины и площади, была проведена серия экспериментов на плоских зарядах для определения зависимости $D=f(\delta_0)$. Плотность ВВ ρ_0 соответствовала плотности свободной засыпки, что максимально приближало условия эксперимента к натурным условиям сварки. Размеры зарядов — высота δ_0 , ширина b , длина l — исключали влияние разлета с боковых свободных граней заряда на процесс детонации и были равны: $b = (3 \div 4) \delta_0$, $l = (10 \div 20) \delta_0$. В данном случае в связи с горизонтальным расположением заряда, обеспечивающим условия свободной засыпки ВВ, была принята схема эксперимента, изображенная на рис. 6.

В третьей серии экспериментов определялась зависимость скорости детонации от толщины слоя при плотности ρ_0 , соответствующей свободной засыпке для различных смесей аммонита № 6 ЖВ и аммиачной селитры.

Для определения скорости детонации использовался электронный хронограф марки «Нептун», имеющий предел измерения по времени $0,25 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$. Метод основан на фиксировании промежутка времени между замыканием (размыканием) двух пар контактов. Зная время прохождения фронта детонации между датчиками (контактами) t и величину базы (расстояния между контактами) L , можно определить скорость детонации.

Результаты экспериментов. Из рассмотрения процесса детонации конденсированных ВВ видно, что скорость детонации D зависит от вида ВВ, начальной плотности ВВ ρ_0 и размера заряда δ_0 .

В первой серии экспериментов при сохранении геометрических размеров заряда определялась зависимость $D=f(\rho_0)$ для гексогена, аммонита и различных смесей аммонита и аммиачной селитры (табл. 1). Используя формулы, определяющие параметры фронта детонации (см., например, [14] и данные экспериментов (табл. 1)), можно приближенно рассчитать параметры на фронте детонационной волны.

В табл. 2 приведены результаты расчета значений плотности продуктов взрыва ρ_D и давления на фронте детонационной волны p_D , которые достаточно наглядно показывают на их зависимость от начальной плотности ВВ и скорости детонации D .

Таблица 1

Вид ВВ	ρ_0 , г/см ³	D , км/сек
Гексоген	1,2	6,6
»	1,1	6,37
»	1,0	5,92
»	0,9	5,48
Аммонит № 6	1,1	4,94
»	1,0	4,12
Аммонит № 6 ЖВ	1,1	3,72
(50/50)	0,9	3,51
Аммонит + (30/70)	0,9	2,46
селитра (15/85)*	0,9	2,11
(5/95)*	0,9	1,81

* Разрушение фронта детонации, приводящее к затуханию процесса.

и при толщинах заряда больших 15 мм практически $D = \text{const}$. Для аммонита величина $d_{\text{пр}}$ достаточно велика, о чем говорит значительное изменение скорости детонации при увеличении толщины заряда δ_0 .

Специальная серия опытов была поставлена по определению зависимости $D = f(\delta_0)$ для различных смесей аммонита № 6 ЖВ с аммиачной селитрой, использование которых вызывается некоторыми особен-

Таблица 2

Вид ВВ	ρ_0 , г/см ³	D , км/сек	p_D , 10^{-5} -атм	ρ_D , г/см ³	u_D , км/сек
Гексоген	1,2	6,62	1,34	1,60	1,69
Аммонит № 6	1,1	4,94	0,72	1,54	1,24
Аммонит № 6 ЖВ	1,1	3,72	0,39	1,46	0,93
Аммонит № 6 + селитра (50/50)	0,9	3,51	0,28	1,20	0,88

ностями сварки металлов, связанными с разрушением ряда металлов и нежелательными откольными явлениями при использовании аммонитов, а также с увеличением времени действия импульса путем снижения скорости детонации.

Были исследованы три состава смесей аммонита № 6 ЖВ и аммиачной селитры, отличающиеся друг от друга весовым содержанием компонентов. Из анализа результатов измерений, приведенных в табл. 3, достаточно отчетливо видна естественная тенденция к снижению скорости детонации при увеличении содержания в смеси аммиачной селитры, а также менее интенсивный рост при этом скорости детонации с увеличением толщины заряда. Здесь, как и в

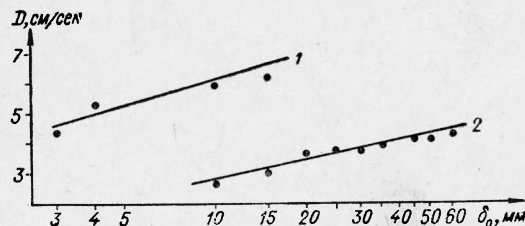


Рис. 7. Зависимость $D = f(\delta_0)$ для плоских зарядов гексогена и аммонита № 6 ЖВ свободной засыпки.

Таблица 3

Вид ВВ	δ_0 , мм	$l \times b$, мм	L , мм	t , м/сек	D , м/сек
Аммонит № 6 ЖВ+аммиачная селитра (50/50)	10	400×80	200	104	1920
	20	400×80	200	88	2280
	30	400×100	200	78	2560
	40	400×120	200	75	2660
	50	400×150	200	70	2860
	60	400×170	200	67	3000
	80	400×200	200	63	3200
	100	400×300	200	57	3500
	120	600×400	300	83	3620
150	600×400	300	88	3400	
Аммонит № 6 ЖВ+аммиачная селитра (33,3/66,6)	20	400×80	200	89	2250
	30	400×100	200	92	2180
	50	400×120	200	86	2320
	60	400×170	200	78	2570
	80	400×200	200	78	2570
	100	400×300	200	75	2670
	120	600×400	300	100	3000
	150	600×400	300	102	2940
Аммонит № 6 ЖВ+аммиачная селитра (25/75)	40	400×120	200	104	1920
	50	400×150	200	102	1960
	60	400×170	200	106	1880
	80	400×200	200	99	2000
	100	400×300	200	93	2150
	150	600×400	300	119	2500

предыдущих экспериментах, заряды имели плотность свободной засыпки.

Если при использовании цилиндрических зарядов насыпного ВВ определяющим геометрическим параметром является диаметр заряда $d_{зар}$, то в случае плоского заряда, определяющим параметром, по-видимому, можно считать $D = f\left(\frac{\delta_0}{b}\right)$,

где b — ширина заряда ВВ, это предположение было проверено экспериментально (табл. 4). В ходе экспериментов была определена ошибка измерения скорости детонации исследуемых смесей, которая составляла величину порядка 2,3%.

Таблица 4

δ_0 , мм	$l \times b$, мм	L , мм	t , м/сек	D , м/сек	$\frac{b}{\delta_0}$
30	260×55	200	81	2470	1,83
30	270×90	200	78	2560	3,00
30	350×160	200	71	2820	5,33

ВЫВОДЫ

1. Результаты работы показали, что при использовании плоских зарядов насыпных ВВ необходимо учитывать изменение скорости детонации D в зависимости от начальной плотности ρ_0 и толщины слоя ВВ δ_0 .

Получены экспериментальные зависимости $D = f(\rho_0)$, $D = f(\delta_0)$, которые используются для определения параметров соударения при сварке взрывом.

2. Применение в качестве ВВ различных смесей аммонита и аммиачной селитры позволяет значительно снизить бризантное действие заряда, что для определенных металлов весьма существенно.

Поступила в редакцию
3/У 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Joining with explosive. American Machinist, 1959, 103, 8, 3.
2. Explosive welding and forming open another door for industry. Welding. Engineering, 1959, 44, 4, 61—62, 64.
3. V. Philipchuk. Explosive welding status—1965. Techn. Paper. American Society of Tool & Manufacturing Engineers. SP65—100. Deaborn, Michigan.
4. V. Philipchuk, F. Bois, Le Roy. Explosive welding. Patent USA, No. 3024526, 1962.
5. P. J. M. Boes, A. P. von Rosenstiel & C. A. Verbraak. Bänder Bleche Rohre, 1965, 6, 269—277.
6. G. Cowan, J. Douglass & A. Holtzman. Explosive bonding. Patent USA, Cl. 29—494, No. 3137937, 23, 6, 1964.
7. H. Brennecke. Explosive bonding. Patent USA, Cl. 29—494, No. 3205574. 14. 9. 65.
8. Explosive welding is on the way. Steel, 1959, 145, 18, 83—85.
9. How explosives weld metals. Iron Age, 1961, 187, 18, 90—91.
10. М. А. Лаврентьев. Успехи математических наук, 1957, 12, 4.
11. G. Birkgoff, D. P. MacDougal, E. Pugh & G. Taylor. J. Appl. Phys., 1948, 19.
12. В. С. Седых, А. А. Дерibas, Е. И. Биченков, Ю. А. Тришин. Сварочное производство, 1962, 5.
13. Now it's explosive welding. Metalworking Production, 1961, 105, 21, 75.
14. Ф. А. Баум, К. П. Станюкович и Б. И. Шехтер. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.