

жениость этих площадок тем больше, чем выше значение  $v$ .

Полученные результаты согласуются с соответствующими распределениями, приведенными в [9].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зубарев В. Н., Евстигнеев А. А. Уравнения состояния продуктов взрыва конденсированных ВВ // ФГВ.— 1984.— 20, № 6.
2. Зельдович Я. Б., Компанец А. С. Теория детонации.— М.: ГИТТЛ, 1955.
3. Бахрах С. М., Евстигнеев А. А., Зубарев В. Н. и др. Влияние конечной скорости разложения ВВ на определение детонационных параметров // ФГВ.— 1981.— 17, № 6.
4. Дорохин В. В., Зубарев В. Н., Орехин Ю. К. и др. Исследование движения продуктов взрыва за фронтом детонационной волны // ФГВ.— 1985.— 21, № 4.
5. Юхансон К., Персон П. Детонация взрывчатых веществ.— М.: Мир, 1973.
6. Мельникова Н. С., Саламахин Т. М. О расчете точечного взрыва в различных газах // ПМТФ.— 1964.— № 4.
7. Станюкович К. П. Неустойчивые движения сплошной среды.— М.: Наука, 1971.
8. Физика взрыва/Под ред. К. П. Станюковича.— М.: Наука, 1975.
9. Taylor J. Detonation in condensed explosives.— Oxford, 1952.

г. Тула

Поступила в редакцию 11/VII 1989,  
после доработки — 19/III 1990

УДК 621.787.044

В. А. Симонов

### О КРИТЕРИИ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Экспериментально обоснован критерий схватывания, как необходимое условие сварки при высокоскоростных косых соударениях пластин. Критерий выражается зависимостью минимального значения скорости точки контакта от микротвердости и плотности свариваемых металлов.

Гидродинамическая модель явлений, сопровождающих высокоскоростные косые соударения поверхностей металлических тел (кумуляция, волнообразование, сварка), не содержит связанных с прочностью металлов ограничений на значения основных кинематических параметров, поскольку считается, что в окрестности точки контакта прочностные силы на два порядка меньше инерционных [1]. Вместе с тем в [2—4] наличие пластических деформаций в зоне соединения отмечается как обязательное условие сварки взрывом. Очевидно, что возникновение пластических деформаций на контактирующих поверхностях не может не зависеть от прочностных свойств свариваемых металлов и должно быть связано с фиксированными значениями параметров соударения.

Наиболее типичное проявление пластической деформации при сварке взрывом — волнообразование. Как установлено в [5], для каждой пары металлов переход от прямолинейной границы соединения к волнообразной осуществляется при постоянном значении скорости точки контакта  $v_k$ , которое определяет соответствующее давление  $p_k$ , связанное либо с микротвердостью металлов  $H_v$  [6], либо с их теоретической прочностью [2] (критерии волнообразования). На плоскости  $(v_k, \gamma)$  (где  $\gamma$  — угол соударения) этот переход выражается прямой  $v_k = \text{const}$ , вдоль которой критическое давление  $\rho v_k^2/2$  остается постоянным. Тогда безволновые режимы соударения должны ограничиваться слева еще одной границей, расположенной между прямой  $v_k = \text{const}$  и осью ординат — начало процесса сварки.

Как известно из теории сварки давлением [7], взаимодействие свариваемых поверхностей начинается с образования физического контакта при смятии микронеровностей. Процесс возникновения локальных оча-

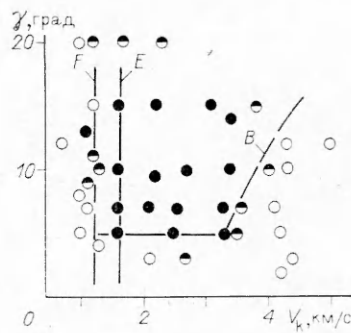


Рис. 1.

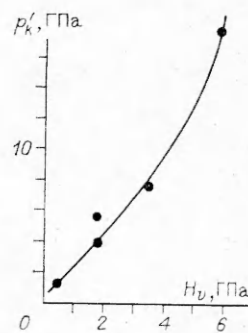


Рис. 2.

гов микропластической деформации обозначается термином схватывание и является необходимым, а иногда и достаточным условием сварки. Однако условия реализации этого процесса при сварке взрывом до сих пор критерияльно не установлены.

В работе [8] предложен критерий перехода от упругих к неупругим соударениям в виде

$$v_k' = k' \sqrt[3]{2H_v/\rho}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность металлов;  $k' \sim 1$  — безразмерный коэффициент. При этом предполагалось, что пластические деформации при неупругих соударениях выражаются только необратимыми изменениями формы и размеров пластин, а такие поверхностные эффекты, как волно- или струеобразование, отсутствуют. Критерий (1) остался незамеченным, поскольку в обширной литературе не удалось найти каких-либо данных о его экспериментальной проверке и использовании. Внимание исследователей было сосредоточено на поиске нижней границы области сварки, которая на плоскости  $v_k, \gamma$  представлялась гиперболой  $v_{0\min} = \text{const}$  [8], где  $v_{0\min}$  — минимальное значение скорости метаемой пластины. При этом считалось, что нижняя граница содержит в себе необходимое и достаточное условие сварки [9—13].

В настоящей работе приводятся экспериментальные данные о положении прямой  $v_k = \text{const}$  на плоскости  $v_k, \gamma$  и интерпретация выражения (1) как критерия схватывания металлов при сварке взрывом.

В опытах использовались пластины из малоуглеродистой стали. Неподвижные пластины имели размеры  $270 \times 40 \times 20$  мм и  $H_v = 1700 \pm 70$  МПа, метаемые —  $320 \times 120 \times 5$  мм и  $H_v = 1500 \pm 70$  МПа. Методика проведения опытов подробно описана в [14]. Результаты соударений представлены на рис. 1 в виде точек плоскости  $(v_k, \gamma)$ . Темными точками обозначены положительные результаты, в которых среднее по площади сварки значение прочности на отрыв лакирующего слоя  $\bar{\sigma} \geq 350$  МПа (условие равнопрочности). Если  $\bar{\sigma} < 200$  МПа, результат считался отрицательным (светлые точки). Для промежуточных значений  $\bar{\sigma}$  результаты соответствовали частичной сварке (см. рис. 1, точки ●). Обозначения границ области сварки взяты из [8].

Приведенные на рис. 1 данные показывают, что условие равнопрочности выполняется при  $v_k \geq 1600 \pm 100$  м/с. Значение  $v_k = 1600$  м/с одновременно определяет положение прямой E — переход к стабильному волнообразованию. В интервале  $v_k = 1000 \div 1400$  м/с прочность соединений нестабильна. Анализ состояния контактирующих поверхностей пластин после соударения обнаруживает элементарные акты схватывания и типичные признаки очагов микродеформации от смятия шероховатостей до появления отдельных бугров и волновых дорожек. Локальная прочность соединений изменяется от 0 до 550 МПа. Это позволяет рассматривать отмеченный интервал как область переходных режимов соударения, в которой с ростом  $v_k$  развивается процесс схватывания. По-видимому,

Сочетания металлов	$H_v$ , ГПа	$v'_k$ м/с	$p'_k$ , ГПа	$k'$	Источник
Медь — медь	0,5	500	1,1	1,4	[16]
Сталь — медь	1,8	1000	4,0	1,5	[14]
Сталь — сталь	1,8	1200	5,6	1,8	[14]
Сталь — нерж. сталь	3,5	1400	7,6	1,5	[15]
Сталь — медь	5,7	2000	17,8	1,7	[12]

в этих режимах существенное влияние на прочность соединения могут оказывать такие факторы, как локальные свойства поверхностей и качество их предварительной подготовки. Минимальной критической скоростью, при которой реализуются условия сварки, можно считать  $v'_k = 1200 \pm 200$  м/с. Сопоставляя это значение с выражением (1), получаем  $k' \approx 1,8$ . Соответствующее давление  $p'_k = 5,6 \pm 1,8$  ГПа примерно в 3 раза превышает  $H_v$  малоуглеродистой стали.

Обобщая имеющиеся в литературе экспериментальные данные по определению нижней границы области сварки [12, 14—16], можно установить  $v_k$  для других сочетаний металлов (см. таблицу). На рис. 2 показана зависимость  $p'_k$  от  $H_v$ , при этом для разнородных металлов выбиралось большее значение  $\bar{H}_v$ , а  $p'_k$  определялось плотностью метаемой пластины. Усредненное значение  $k' = 1,6 \pm 0,1$ , тогда  $p'_k$  в 2—3 раза превышает максимальную прочностную характеристику металлов. Постоянство коэффициента  $k'$  позволяет предполагать, что при косых соударениях пластин имеется однозначное соответствие между внешней нагрузкой, выражаемой давлением в окрестности точки контакта и реакцией материала, т. е. возникающими в той же окрестности касательными напряжениями, превышающими предел текучести свариваемых металлов для заданных условий нагружения и деформирования.

Таким образом, предложенный в [8] критерий (1), представляемый на плоскости ( $v_k, \gamma$ ) в виде прямой  $v_k = \text{const}$  и разделяющий упругие и неупругие соударения, можно интерпретировать как критерий схватывания металлов в условиях сварки взрывом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели.— М.: Наука, 1973.
2. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии.— М.: Металлургия, 1978.
3. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом.— Новосибирск: Наука, 1980.
4. Седых В. С. Классификация, оценка и связь основных параметров сварки взрывом // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Сб. ст.— Волгоград, 1985.
5. Дерибас А. А., Кудинов В. М., Матвеев Ф. И. Влияние начальных параметров на процесс волнообразования при сварке металлов взрывом // ФГВ.— 1967.— 3, № 4.— С. 561—568.
6. Cowan G. R., Bergmann O. R., Holtzman A. N. Mechanism of bond zone wave formation in explosion-clad metals // Metallurg. Trans.— 1971.— 2, № 11.— P. 3145—3155.
7. Каракозов Э. С. Сварка металлов давлением.— М.: Машиностроение, 1986.
8. Дерибас А. А. Классификация течений, возникающих при косых соударениях металлических пластин // II Междунар. симп. «Использование энергии взрыва для производства металлических материалов с новыми свойствами», ЧССР, Марианские Лазни, 1973: Сб. докл.— Пардубице, 1973.
9. Захаренко И. Д. Критические режимы при сварке взрывом // ФГВ.— 1972.— 8, № 3.— С. 422—428.
10. Стефанович Р. В. Пластическая деформация металлов и ее связь с критическими режимами при сварке взрывом // Порошковая металлургия.— 1978.— Вып. 2.
11. Беляев В. И., Девойно Д. Г., Касперович В. Б. О нижней границе режимов сварки взрывом // Порошковая металлургия.— 1981.— Вып. 5.
12. Захаренко И. Д., Злобин Б. С. Влияние твердости свариваемых металлов на положение нижней границы сварки взрывом // ФГВ.— 1983.— 19, № 5.— С. 170—174.

13. Лысак Б. П., Седых В. С., Трыков Ю. П. Определение критических границ процесса сварки взрывом // Свароч. пр-во.— 1984.— № 5.— С. 6—8.
14. Simonov V. A. Of the form of the lower boundary of explosive welding region // Xth Intern. Conf. of HERF, Yugoslavia, 1989.
15. Дерibas А. А., Пай В. В., Симонов В. А. Особенности соударения крупногабаритных пластин и дополнительные ограничения области сварки // III Междунар. симп. «Использование энергии взрыва для производства материалов с новыми свойствами», ЧССР, Марианские Лазни, 1976; Сб. докл.— Пардубице, 1976.
16. Симонов В. А. Сравнение нижних границ области сварки двух композиций на основе стали // IXth Intern. Conf. of HERF, Новосибирск, 1986; Сб. докл.— Новосибирск, 1986.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 10/1 1990

УДК 534.222.2

С. М. Фролов, Б. Е. Гельфанд

### ОСЛАБЛЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В ГАЗОВЗВЕСЯХ

Предложен приближенный метод расчета ослабления ударной волны в газозвеси. Полученное решение позволяет оценить длину зоны установления равновесного течения за волной и проанализировать особенности распространения ударной волны в газозвеси.

Для многих практических приложений важно знать законы ослабления ударных волн (УВ) в газозвесях. Под газозвесью понимается среда, состоящая из газа с диспергированными твердыми частицами, не взаимодействующими друг с другом. Исследованию этого вопроса посвящена обширная литература. Предложены теоретические модели одномерного течения двухфазной среды газ — частицы за УВ (например, [1—7]), проведены детальные эксперименты [1, 2, 4, 5]. Теоретические модели релаксационного процесса взаимодействия УВ с газозвесью до установления равновесного течения, как правило, включают полную систему уравнений движения гетерогенной среды с дополнительными соотношениями, в той или иной мере отражающими законы межфазного взаимодействия. Ввиду сложности полной нестационарной задачи ее решение находят численными методами. В некоторых случаях (например, [6]) на основе параметрического численного исследования получены универсальные зависимости, справедливые в некотором диапазоне определяющих параметров и позволяющие приближенно рассчитать ослабление УВ до равновесной интенсивности.

В данной работе предложен альтернативный подход к расчету ослабления УВ в газозвеси, основанный на гипотезе [8]. Найденное приближенное решение позволяет оценить длину переходной зоны, на которой скорость УВ падает от исходного значения до равновесного, а также проанализировать некоторые другие особенности распространения УВ в газозвесях.

**Постановка задачи.** Рассмотрим эволюцию плоской УВ ступенчатого профиля после входа в облако однородной газозвеси, расположенное на участке  $(0, +\infty)$ . Газозвесь характеризуется массовой концентрацией  $n_p$  и средним диаметром частиц  $d_p$  с плотностью материала  $\rho_p^0$ . Предположим, что первоначально на участке  $(-\infty, 0)$  УВ двигалась с постоянной скоростью. Полагая течение одномерным [1—7], запишем основные уравнения для несущей фазы (газа)

$$\rho_t + u\rho_x + \rho u_x = 0, \quad (1)$$

$$\rho u_t + \rho u u_x + p_x = -F, \quad (2)$$

$$p_t + u p_x - a^2(\rho_t + u\rho_x) = (\gamma - 1)[F(u - u_p) - Q], \quad (3)$$

$$p = \rho RT, \quad (4)$$