

где L_1 — длина цилиндра после деформации; H — длина недеформированного участка цилиндра, дает для $v = 217$ и 195 м/с соответственно 0,23 и 0,20 ГПа.

Таким образом, на основании результатов выполненной работы можно сделать вывод о возможности использования получаемых с помощью метода РСГ характеристик поликарбоната в качестве параметров для расчета динамических задач типа соударения тел с преградами. Результаты, получаемые по формуле Тейлора, выведенной на основе одномерной теории распространения волн в жесткопластическом материале, дают завышенные значения динамического предела текучести.

ЛИТЕРАТУРА

1. Динамика удара.— М.: Мир, 1985.
2. Писаренко Г. С. и др. Проблемы прочности, 1970, 7, 3.
3. Пльюшин А. А. Инженерный сборник, 1941, 1, 1, 13.
4. Taylor G. I. Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A, 1948, 194, 289.
5. Альтшулер Л. В. УФН, 1965, 1, 2, 197.
6. Минеев В. Н. и др. ФГВ, 1978, 14, 3, 129.
7. Уилкинс М. Л. // Вычислительные методы в гидродинамике.— М.: Мир, 1967.
8. Curran D. R. et al. J. Appl. Phys., 1973, 44, 9, 4025.
9. Ломунов А. К. Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Горький, 1987.

г. Москва

Поступила в редакцию 21/II 1989,
после доработки — 7/VIII 1989

УДК 621.787.044

В. А. Симонов

О ФОРМЕ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАСТИ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

Согласно существующим представлениям, нижняя граница области сварки взрывом определяется минимальным значением угла соударения γ [1, 2], которое связывается с микротвердостью H_v и скоростью точки контакта v_k выражением

$$\gamma = 1,14 \sqrt{H_v / \rho v_k^2}, \quad (1)$$

или минимальным значением скорости метаемой пластины v_{0min} , связанным с прочностью σ_b [3, 4]:

$$v_{0min} = \sqrt{\sigma_b / \rho}, \quad (2)$$

где ρ — плотность металлов. Оба определения могут быть приведены к виду

$$v_{0min} = v_k \gamma = \text{const} = f(\sigma, \rho),$$

где константа зависит от выбора прочностной характеристики. Поскольку H_v в 2—5 раз превосходит σ_b для обычных конструкционных металлов и сплавов, величины v_{0min} , рассчитанные по (1) и (2), априорно различны. Экспериментальные данные [5—9] в простейших случаях сварки однородных металлов (например, медь—медь) дают заметно отличающиеся между собой значения v_{0min} , не совпадающие с расчетом по (1), (2). С другой стороны, в [10—12] приведены результаты опытов, согласно которым условия образования равнопрочных соединений реализуются существенно ниже (1) и независимо от v_0 в широком диапазоне изменения v_k .

В связи с этим возникают обоснованные вопросы о причинах принципиального различия формы и положения нижней границы на плоскости (v_k, γ), существования двух критериев (1), (2) и их несоответствия

опытным данным [5—12]. Приведенная в [12] экспериментальная зависимость минимального значения отношения массы ВВ к массе метаемой пластины от ее толщины δ_1 , обеспечивающая получение равнопрочных соединений, могла бы рассматриваться авторами как доказательство независимости положения нижней границы от v_0 . Однако в [12] высказано предположение о невозможности практической реализации режимов соударения с параметрами v_k , γ , лежащими ниже зависимости (1).

Критерий (1) основывался в основном на результатах симметричных соударений [13], (2) — несимметричных. Поэтому целесообразно выяснить соответствие положения нижней границы для той и другой схем сварки.

По своим свойствам медь — наиболее удобный и доступный материал для модельных исследований косых соударений. В лабораторных условиях проведены четыре серии опытов, отличающиеся размерами свариваемых пластин. В симметричной схеме (серии I и II) использовались пластины с размерами $100 \times 20 \times (1 + 1)$ мм и $120 \times 50 \times (4,5 + 4,5)$ мм, в несимметричной — $100 \times 20 \times (4 + 1)$ мм и $260 \times 80 \times 10 + 300 \times 100 \times 5$ мм (III и IV). Во всех опытах измерялась скорость детонации D , а в отдельных опытах для контроля измерялись углы поворота метаемой пластины для конкретных видов ВВ и размеров зарядов, что позволяло вычислять значения v_0 , v_k и γ по известным соотношениям [14] с точностью $\pm 15\%$. Качество сварки в первых трех сериях оценивалось по данным металлографического анализа двух шлифов, а в последней — по данным механических испытаний прочности соединения. Сваренные пластины разрезались, как показано на рис. 1. Из квадратных заготовок вытачивались образцы для испытаний на отрыв плакирующего слоя [6], из прямоугольных готовились шлифы. Если среднее по площади сварки значение прочности соединения $\bar{\sigma}$ из 3—4 испытаний было не меньше исходной прочности меди $\sigma_b = 200$ МПа, результат считался положительным. Если $\bar{\sigma}$ оказывалась не меньше половины σ_b , результат отмечался как частичная сварка.

Данные опытов представлены на рис. 2 в виде точек плоскости (v_k , γ). В первой серии (рис. 2, а) наименьшее значение $v_0 = 220$ м/с было ограничено снизу минимально возможной высотой заряда $\delta_0 = 3$ мм при $D = 2200$ м/с. Этим же условием ограничена величина $\gamma/2 = 6^\circ$. Для получения меньших значений v_k и γ использовались пластины толщиной 4,5 мм (серия II).

Результаты третьей серии почти полностью совпадают с данными, полученными на пушке для одинаковых v_k , γ [5], и на рис. 2, б отмечены только те из них, которые по v_k , γ не совпадают с опытами четвертой серии. Если положение нижней границы определять микротвердостью меди $H_v = 500$ МПа по (1), то $v_{0\min} = 270$ м/с, если прочностью по (2), то $v_{0\min} = 150$ м/с. На рис. 2 эти кривые обозначены соответственно А и А'.

В симметричной схеме соударений не были достигнуты значения основных параметров, соответствующие отрицательным результатам опытов. Полученные минимальные скорости пластины, при которых реализуются условия сварки, существенно меньше критических, определяемых выражениями (1), (2), и равны 220 и 80 м/с соответственно для пластин толщиной 1 и 4,5 мм. Отсюда следует, что если и существует критическая $v_{0\min}$, то она должна быть меньше 80 м/с. Отметим, что достигнутые в этих опытах минимальные v_k равны 500 и 760 м/с для тонких и для толстых пластин.

Результаты несимметричных соударений также подтверждают возможность образования равнопрочных соединений в области, лежащей

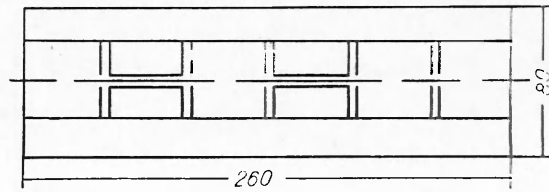


Рис. 1. Схема разрезки двухслойных пластин.

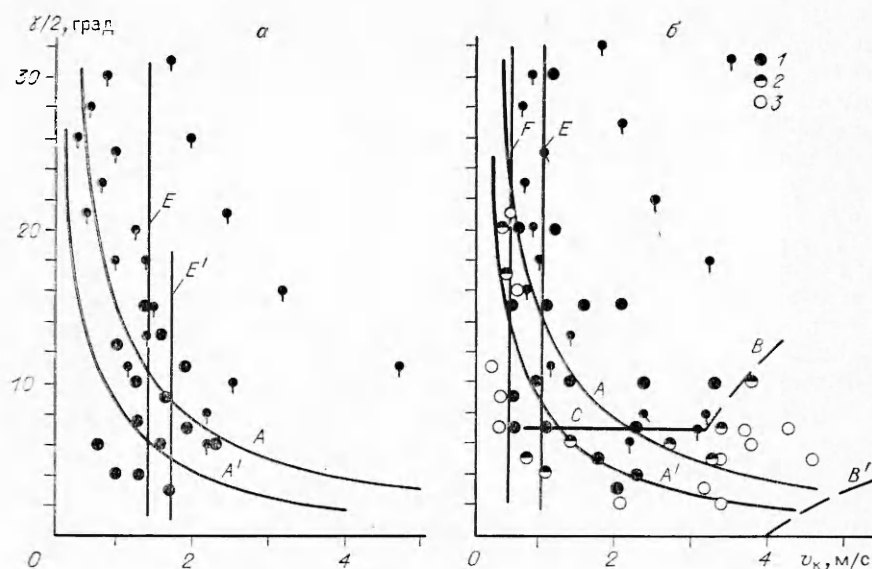


Рис. 2. Плоскость (v_k, γ) .
 1 — сварка; 2 — частичная сварка; 3 — сварки нет. а) симметричная; б) несимметричная схемы соударений.

ниже кривых A и A' . Учитывая данные [5], можно было бы считать, что для тонких пластин $v_{0\min} = 220$ м/с. Однако в точке $v_k = 600$ м/с, $\gamma = 21^\circ$ сварка отсутствует, а в точке $(2200; 6)$ имеем частичную сварку. По существу, это означает изменение условий образования соединений вдоль кривой $v_0 = 220$ м/с, принимаемой в качестве нижней границы сварки тонких медных пластин, что противоречит определению границы. Для толстых пластин равнопрочность соединения достигается при $v_0 = 80$ м/с, но в единственной точке $(640; 7)$. Кривая $v_{0\min} = 80$ м/с в смысле определения границы превращается в точку. Отсюда следует, что для любого v_0 , принадлежащего области дозвуковых соударений, всегда найдутся такие v_k и γ , при которых сварка отсутствует. Таким образом, любая кривая, соответствующая постоянной скорости метания, не может ограничивать область сварки.

Существование разных экспериментальных значений $v_{0\min}$, зависящих от толщины метаемых пластин, однозначно доказывает, что положение кривых A и A' не связано с прочностными характеристиками меди. В последней серии опытов при $v_0 = 160$ м/с прочность соединения на начальном участке длиной примерно 120 мм удовлетворяла условию равнопрочности, а затем резко снижалась до нуля, т. е. если бы длина неподвижной пластины не превышала 120 мм, как во второй серии, то результаты опытов были бы положительны. Уменьшая вдвое ширину неподвижной пластины и стабилизируя детонацию зарядов критической высоты, удалось снизить v_0 до 80 м/с и заполнить положительными результатами область плоскости (v_k, γ) ниже кривой A' . Отсюда можно предположить, что параметры соударения (v_0, v_k, γ) по мере движения точки контакта уменьшаются и становятся ниже критических вследствие влияния сжатого в зазоре воздуха. Тогда в зависимости от толщины метаемых пластин определяется то или иное $v_{0\min}$. Сопротивление воздуха становится решающим, если исходная кинетическая энергия пластин не превышает $0,2$ МДж/м². По-видимому, возможна и другая причина — постепенное затухание детонации плоского заряда критической толщины, что также снижает параметры соударения.

В [1] сформулирован критерий, разделяющий упругие и неупругие соударения:

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

где k' — коэффициент порядка единицы. При этом предполагалось, что неупругие соударения характеризуются только необратимыми изменениями формы и размеров пластин. Данные экспериментальной проверки условия (3) в литературе отсутствуют. Анализируя полученные результаты для меди, можно отметить, что в действительности при $v_k \leq 600$ м/с (прямая F на рис. 2) на контактирующих поверхностях наблюдаются локальные очаги микропластической деформации в виде отдельных бугров или волновых дорожек, а на участках с площадью ~ 1 мм² возможно образование равнопрочных соединений.

Переход к макропластической деформации соударяющихся поверхностей в виде регулярных волн в симметричной схеме (прямые E, E' , рис. 2, а) соответствует значению $v_k'' = 1400 \pm 200$ м/с для $\delta_1 = 1,0$ мм и $v_k'' = 1700 \pm 150$ м/с для $\delta_1 = 4,5$ мм. В несимметричной схеме (прямая E , рис. 2, б) $v_k'' = 1050 \pm 100$ м/с независимо от δ_1 . В этом и состоит основное отличие симметричных и несимметричных соударений. Последнее значение v_k'' точно совпадает с известными критериями [1, 12, 15]. Прямая E , вообще говоря, не является граничной линией для области сварки. Тем не менее, приведенные данные о расширении диапазона безволновых режимов в симметричной схеме могут учитываться при обосновании гипотез о механизме волнообразования.

Согласно данным [5], требование равнопрочности при сварке медных пластин не выполняется в дозвуковой области изменения v_k , если $\gamma \leq 5^\circ$. Как видно из рис. 2, при изменении γ от 3 до 7° в абсолютном большинстве опытов $\sigma < \sigma_b$. Как правило, это связано с отсутствием сварки на начальном участке соударения — $\sigma_1 = 0$. Вместе с тем в некоторых точках плоскости (v_k, γ) при малых углах соударения прочность соединения превышает прочность меди. Отсюда следует, что в этом интервале изменения γ условия образования соединений нестабильны. Если построить зависимости усредненных значений максимальной локальной прочности $\bar{\sigma}_{i \max}$ и средней прочности $\bar{\sigma}_n$ от угла соударения для всех опытов с постоянным γ , то, как видно из рис. 3, $\bar{\sigma}_{i \max}$ может превосходить σ_b уже при $\gamma = 3^\circ$. Обе величины возрастают с ростом γ и превосходят σ_b при $\gamma = 7^\circ$ в диапазоне $v_k = 600 - 3300$ м/с. Отрезок C ($\gamma = 7^\circ$) и следует считать нижней границей области сварки для меди, поскольку результаты соударений при $v_k \geq 600$ м/с и $\gamma \geq 7^\circ$ положительны и не зависят от v_k, γ , принадлежащих этой области. По существу, эти пределы основных кинематических параметров определяют необходимое и достаточное условия образования равнопрочных соединений медных пластин. Существование нижней границы в виде отрезка прямой $\gamma = 7^\circ$ подтверждается данными [10, 11] для других сочетаний металлов.

Это позволяет определить область сварки взрывом как множество точек плоскости (v_k, γ), на котором реализация условий образования равнопрочных соединений не зависит от конкретных значений v_0, v_k и γ и от свойств свариваемых металлов. Тогда границами области сварки будут линии или полосы конечной ширины, где это требование не выполняется.

Таким образом, экспериментально доказана невозможность представления нижней границы области сварки критериями (1), (2). Для заданного интервала v_k ограничение области сварки снизу представляется отрезком прямой $\gamma = \gamma_{\min}$. Кривая B требует отдельного рассмотрения.

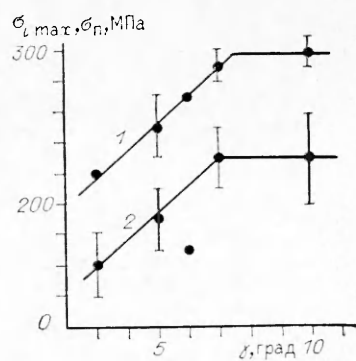


Рис. 3. Зависимость $\bar{\sigma}_{i \max}$ (1) и $\bar{\sigma}_n$ (2) от угла соударения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерибас А. А. // II Междунар. симп. «Обработка металлов взрывом». — Марианские Лазни, 1973.
2. Дерибас А. А., Захаренко И. Д. ФГВ, 1974, 10, 3, 409.
3. Wittman В. И. // II Междунар. симп. «Обработка металлов взрывом». — Марианские Лазни, 1973.
4. Беляев В. И., Девойно Д. Г., Касперович В. Б. Порошковая металлургия, 1981, 5, 99.
5. Szecket A., Crossland В. // 6th Intern. Conf. of HERF.— Essen, 1977.
6. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом.— Новосибирск: Наука, 1980.
7. Лысак В. И., Седых В. С., Трыков Ю. П. Сварочное производство, 1979, 3, 7.
8. Смелянский В. Я., Рыскулов М. Т., Кожевников В. Е. // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Сб. науч. тр.— Волгоград, 1986.
9. Соннов А. П., Шморгун В. Г. // Там же.
10. Дерибас А. А., Пай В. В., Симонов В. А. // III Междунар. симп. «Обработка металлов взрывом». — Марианские Лазни, 1976.
11. Симонов В. А. // 9th Intern. Conf. of HERF.— Новосибирск, 1986.
12. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии.— М.: Металлургия, 1978.
13. Захаренко И. Д. ФГВ, 1972, 8, 3, 422.
14. Дерибас А. А., Кудинов В. М., Матвеев Ф. И. и др. ФГВ, 1967, 3, 2, 291.
15. Каракозов Э. С. Сварка металлов давлением.— М.: Машиностроение, 1986.
16. Cowan G. R., Bergmann O. R., Holtzmann A. N. Metallurg. Trans., 1971, 2, 11, 3145.

г. Новосибирск

*Поступила в редакцию 2/XII 1988,
после доработки — 30/X 1989*