

22. Bethe H. A., Fuchs K., Hirschfelder H. O. et al. Blast waves. LASL 2000, Los Alamos Sci. Lab., 1947.
23. Witham G. B. // J. Fluid Mech.— 1956.— 1, N 3.— P. 290.
24. Lee J. H. S. Analytical theories for intermediate and far field decay of blast waves. McGill Univ. Rep.— Montreal, 1977.
25. Guirao C. M., Lee J. H. S., Bach G. G. The propagation of non-ideal blast waves // Conf. on mechanisms of explosion and blast waves.— Yorktown, USA, 1973.
26. Baker W. E. Explosions in air. Wilfred Baker Engng.— San Antonio, Texas, 1983.

г. Оттава (Канада)

Поступила в редакцию 13/III 1990

УДК 621.787.044

В. А. Симонов

О СВЯЗИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ С УГЛОМ СОУДАРЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Рассмотрено влияние основных параметров косых соударений металлических пластин на степень пластической деформации в зоне контакта и ее связь с положением нижней границы области сварки на плоскости (v_k, γ).

При сварке взрывом, как и в других способах сварки металлов давлением, соединение образуется вследствие совместной пластической деформации контактирующих поверхностей, величина которой определяет конечные свойства соединений [1]. Режимы соударения свариваемых пластин задаются тремя основными кинематическими параметрами: скоростью метаемой пластины v_0 , скоростью точки контакта v_k и углом соударения γ [2]. В настоящей работе рассматривается влияние этих параметров на степень пластической деформации в зоне контакта и ее связь с положением нижней границы области сварки на плоскости (v_k, γ).

Наиболее типичной формой пластической деформации при сварке взрывом является волнообразование. Длина волны λ , согласно [3], выражается формулой

$$\lambda = 26\delta_1 \sin^2\gamma/2, \quad (1)$$

где δ_1 — толщина метаемой пластины. Амплитуда волн $a = 0,2\lambda$. Из (1) следует, что линейные размеры волн в области их существования не зависят от v_0 и v_k , а зависят только от γ . Этот экспериментальный факт позволяет предполагать, что на степень пластической деформации, обеспечивающей необходимую прочность соединений, влияет только γ .

Как показано в [4—7], нижняя граница области сварки в фиксированных интервалах изменения v_k представляется отрезком прямой линии $\gamma = \gamma_{\min}$ как для однородных (медь — медь, сталь — сталь), так и для разнородных (сталь — медь, сталь — нержавеющая сталь) сочетаний металлов. Экспериментальное определение γ_{\min} основано на требовании выполнения условия равнопрочности соединений, согласно которому прочность на отрыв плакирующего слоя σ должна быть не меньше временного сопротивления σ_b слабейшего металла композиции. В [4, 5] качество соединений в каждом опыте оценивалось средней по площади сварки прочностью $\bar{\sigma}$ и максимальным значением локальной прочности $\sigma_{i,\max}$. Для каждого γ величины $\bar{\sigma}$ и $\sigma_{i,\max}$ усреднялись по всем опытам, в которых $\bar{\sigma}$ было не меньше $0,5\sigma_b$.

Обозначим усредненные по γ и нормированные на $\sigma_b = 200$ МПа для меди и $\sigma_b = 350$ МПа для стали значения $\bar{\sigma}$ и $\sigma_{i,\max}$ через σ_1 и σ_2 соответственно. Зависимости $\sigma_1(\gamma)$ и $\sigma_2(\gamma)$ приведены на рис. 1, 2. При $\gamma = 2^\circ$ имеем $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$, контактирующие поверхности пластин остаются гладкими, как при плоском ударе. Увеличение γ на $1-2^\circ$ приводит к быстрому росту σ_1 , а σ_2 превосходит единицу, т. е. условие равнопрочности выполняется локально. В зоне шва наблюдаются микрорасплавы и нерегулярные деформации в виде отдельных бугров и волновых дорожек. Это

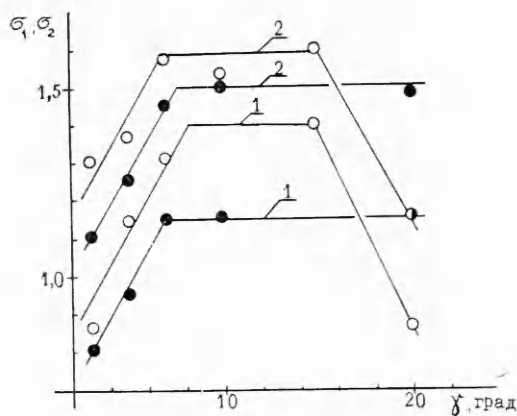


Рис. 1.

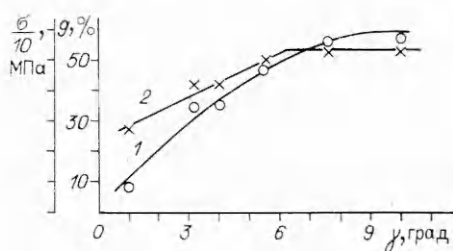


Рис. 2.

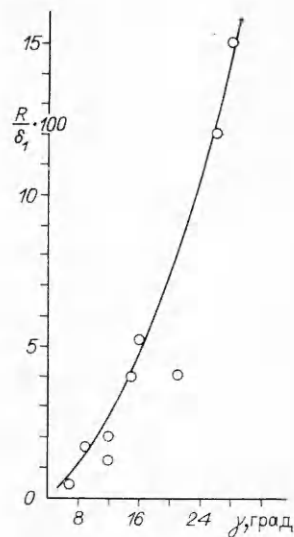


Рис. 3.

свидетельствует о нестабильности условий образования соединений. В связи с этим дозвуковые соударения с $\gamma < \gamma_{\min}$ можно рассматривать как область переходных по γ режимов сварки.

Условие $\sigma_1 \geq 1$ выполняется при $\gamma = 7$ и 5° соответственно для меди и стали. При $\gamma = 7 \div 20^\circ$ величина σ_1 для меди остается практически постоянной, σ_2 возрастает примерно в 1,5 раза. Максимум σ_1, σ_2 для стали достигается в интервале $7-15^\circ$ с последующим резким спадом при $\gamma \approx 20^\circ$. Такой же эффект отмечается при сварке малоуглеродистой и нержавеющей сталей. В условиях стабильного волнообразования σ падает до нуля независимо от v_k , если $\gamma \leq 20^\circ$ [7]. Эти результаты полностью совпадают с данными работы [8], в которой авторы использовали металлические пластины толщиной 3 мм, а прочность соединения рассматривали как функцию начального угла α . Таким образом, для сочетаний сталь — сталь [5], сталь — нержавеющая сталь [7, 8] и алюминий — алюминий [8] угол $\sim 20^\circ$ критический и, по существу, определяет верхнюю границу области сварки, по крайней мере для $\delta_1 \geq 5$ мм. Для композиций медь — медь [4] и сталь — медь [6, 8] максимальный $\gamma_{\text{кр}}$ пока не установлен. Несомненно, что верхняя граница в виде $\gamma_{\text{max}} = \text{const}$ обусловлена еще не выясненными особенностями высокоскоростной деформации металлов в условиях косых соударений.

Реализация условия равнопрочности при $\gamma \geq \gamma_{\min}$ совпадает с переходом к устойчивому волнообразованию. Это позволяет предполагать, что отрезок прямой $\gamma = \gamma_{\min}$ задает некоторый критический размер зоны высоких давлений, при котором величина сдвиговой деформации становится достаточной для образования равнопрочных соединений на всей площади сварки.

Определение сдвиговой деформации представляет собой самостоятельную и достаточно трудную задачу. Измерение смещений непосредственно на контактирующих поверхностях практически невыполнимо. В зависимости от разрешающих возможностей методики авторы получают разные значения максимальных смещений, поскольку измеряют их на разных расстояниях с границы, разделяющей сваренные пластины. При этом остается открытым вопрос о точности измерений. В работе [9], по-видимому, впервые измерялось смещение при сварке стальных пластин, и получена линейная зависимость σ от деформации g . Используя данные поста-

повки опытов и известные соотношения для угла поворота метаемой пластины [10], можно установить, что в этих опытах γ изменялся от 1 до 10° . По рассчитанным значениям γ можно построить зависимости $g(\gamma)$ и $\sigma(\gamma)$, представленные на рис. 2, 1, 2. Сравнение графиков показывает, что достаточная для реализации условия равнопрочности деформации сдвига $g \approx 35\%$ достигается в интервале $\gamma = 4 \div 7^\circ$, т. е. в области переходных режимов сварки.

По данным измерений g с помощью реперных вставок [11] условие равнопрочности выполняется «независимо от технологических режимов и свойств материалов» при $g \approx 25\%$. В частности, это значение соответствует $\gamma = 14^\circ$. Как видно, результаты работ [9, 11] трудно сопоставимы, поскольку практически совпадая по g , существенно отличаются по γ .

Методически иной подход к определению g предложен в [12]. Авторы выделяют зону интенсивной пластической деформации как толщину околошовного слоя R , где $g > 100\%$. По приведенным в работе цифровым данным можно получить зависимость $R(\gamma)$, представленную на рис. 3, где значения R нормированы на толщину метаемой пластины, равную 5 мм. Сравнение λ и R дает среднее значение коэффициента пропорциональности между ними, равное 10,7. Тогда экспериментальные точки аппроксимируются формулой

$$R = 2,6\delta_1 \sin^2 \gamma / 2. \quad (2)$$

Выражение (2) подтверждает сделанные выше предположения о том, что линейные размеры, характеризующие степень пластической деформации, изменяются так же, как и размеры волн. Следовательно, g зависит только от γ . В своей последующей работе [13] авторы [12] подтверждают постоянство значений R при $\gamma = \text{const}$ и их независимость от v_k и качества обработки свариваемых поверхностей.

Эти результаты однозначно решают вопрос о форме нижней границы области сварки взрывом. Если прочность соединения определяется степенью деформации, которая зависит только от γ , то нижняя граница, соответствующая условию равнопрочности, должна представляться на плоскости (v_k, γ) отрезком прямой $\gamma_{\text{min}} = \text{const}$, заключенным между прямой $v'_k = \text{const}$ [5] и кривой B [14].

Выражение (2) и характер зависимости $\bar{\sigma}(\gamma)$ позволяют утверждать, что γ_{min} определяет толщину поверхностного слоя свариваемых пластин, в котором сдвиговая деформация достигает значения, обеспечивающего выполнение условия равнопрочности на всей площади сварки. В этом состоит физический смысл нижней границы области сварки. Для исследованных сочетаний металлов толщина этого слоя составляет примерно 1% толщины метаемой пластины. Принимая во внимание критерий схватывания [5] в виде $v'_k = \text{const}$, можно считать, что вместе с критерием нижней границы $\gamma = \gamma_{\text{min}}$ эти предельные снизу значения основных кинематических параметров косых соударений являются необходимыми и достаточными условиями сварки взрывом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седых В. С. Классификация, оценка и связь основных параметров сварки взрывом // Сварка взрывом и свойства сварных соединений.— Волгоград, 1985.
2. Дерibas А. А., Кудиннов В. М., Матвеевков Ф. И. и др. Определение параметров соударения плоских тел, метаемых ВВ в условиях сварки взрывом // ФГВ.— 1967.— 3, № 2.— С. 291—298.
3. Дерibas А. А., Кудиннов В. М., Матвеевков Ф. И. и др. О моделировании процесса волнообразования при сварке взрывом // ФГВ.— 1968.— 4, № 1.— С. 100—107.
4. Симонов В. А. О форме нижней границы области сварки взрывом // ФГВ.— 1990.— 26, № 4.— С. 132—136.
5. Симонов В. А. О критерии схватывания металлов при сварке взрывом // ФГВ.— 1991.— 27, № 1.
6. Симонов В. А. Сравнение нижних границ области сварки двух композиций на основе стали // IXth Int. Conf. of NERF.— Новосибирск, 1986.— С. 313—316.
7. 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.— Т. 1.— С. 117—130.
8. Седых В. С., Бондарь М. П. Основные параметры сварки взрывом и прочностные характеристики сварных соединений // Свароч. пр-во.— 1963.— № 2.— С. 1—5.
 9. Кривенцов А. Н., Седых В. С. О роли пластической деформации металла в зоне соединения при сварке взрывом // Физика и химия обработки материалов.— 1969.— № 1.— С. 132—141.
 10. Кузьмин Г. Е. О метании пластин в условиях сварки взрывом // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр./АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики.— 1977.— Вып. 29.— С. 137—142.
 11. Стефанович Р. В. Пластическая деформация металлов и ее связь с критическими режимами при сварке взрывом // Порошковая металлургия.— 1978.— Вып. 2.— С. 51—56.
 12. Бондарь М. П., Оголихин В. М. О пластической деформации в зоне соединения при плакировании взрывом // ФГВ.— 1985.— 21, № 2.— С. 147—151.
 13. Бондарь М. П., Оголихин В. М. Пластическая деформация и образование связи при сварке медных пластин // ФГВ.— 1988.— 24, № 1.— С. 122—127.
 14. Дерibas А. А. Классификация течений, возникающих при косых соударениях металлических пластин // Междунар. симп. «Использование энергии взрыва для производства металлических материалов с новыми свойствами», ЧССР, Марианские Лазни, 1973.— Т. 1.— С. 31—43.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 2/VII 1990

УДК 53.082.73 + 531.787.913 + 534.222.2

Г. А. Лямин, А. В. Пинаев, А. С. Лебедев

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ И СТАТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ

Разработаны пьезодатчики на основе пьезокерамики, природного и искусственного турмалинов для измерения давлений ≤ 3 кбар. Показана эквивалентность статического и динамического методов тарирования, предложена методика скоростного удара с гладким прямоугольным профилем давления. Установлено, что в пьезокерамике отсутствуют релаксационные процессы и ее пьезомодуль не зависит от давления, если измерения вести по схеме, исключающей утечку зарядов.

1. Измерения давлений можно разделить на прямые, при которых регистрируют силовые воздействия среды на чувствительный элемент датчика или прибора, и косвенные, когда по различным физическим эффектам самой среды или по изменению ее параметров определяют величину давления. К косвенным методам прибегают в случае невозможности размещения датчика в измеряемой среде или при работе с вакуумом.

В физике быстротекущих процессов наибольшее использование нашли прямые методы; разрешение 10^{-4} — 10^{-7} с обеспечивают с помощью датчиков из пьезоэлектриков (кварца, турмалина, пьезокерамики) [1—12], полупроводниковых или резистивных преобразователей давления [13—18], электретов [19—21]. В отдельных случаях, когда сильные электромагнитные помехи мешают измерению электрических сигналов, применяют оптические методы — в [22] разработана методика спектрального измерения сдвига R_1 -линии люминесценции рубина в зависимости от приложенного давления. Измерение тензочувствительности пьезоэлектриков (зависимости их резонансной частоты от механических напряжений [23]) существенно расширяет границы их применения, поскольку позволяет регистрировать не только импульсные, но постоянные и медленно меняющиеся давления в течение очень длительного времени.

В литературе существуют различные мнения по поводу возможности использования отдельных чувствительных материалов для датчиков. Так, в [24] приведены данные о зависимости пьезомодуля керамики ЦТС-19 от времени нагружения ($2 \cdot 10^{-6}$ — 10^{-1} с) при давлениях $p \leq 500$ атм. Авторы [11], получив совпадение статической и динами-