

нуля (как это имеет место в случае кислорода), точка пересечения отсутствует, увеличение скорости сверх ее значения в точке Жуге в рамках этой модели невозможно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бохон Ю. А., Головачева И. Ф., Микац В. В. и др. Исследование взрывчатых свойств криогенных гетерогенных смесей на основе жидкого водорода в зарядах различной конфигурации // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация.— Черногоровка, 1977.— С. 111.
2. Гостищев Ю. А., Ковтун И. В., Одинцов В. В. Расчет параметров идеальной детонации в криогенных смесях «водород — кислород» // Тез. докл. 4-го Всесоюз. совещ. по детонации.— Телави, 1988.— С. 231.— Т. 1.
3. Кондриков Б. Н., Сумин А. И. Уравнение состояния газов при высоком давлении // ФГВ.— 1987.— 23, № 1.— С. 114.
4. Taylor J. Detonation in condensed explosives.— Oxford: The Clarendon Press, 1952.— 196 p.
5. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации: Пер. с англ.— М.: Мир, 1985.— 384 с.
6. Губин С. А., Одинцов В. В., Пепекин В. И. Диаграмма фазовых состояний углерода и ее учет в расчетах параметров детонации // Хим. физика.— 1986.— 5, № 1.— С. 111.
7. Митрофанов В. В. О сверхскоростной детонации в зарядах с продольными капалами // ФГВ.— 1975.— 11, № 1.— С. 73.
8. Мардашев А. М., Митрофанов В. В., Бакиров И. Т. Расчетные модели двухслойной детонации // Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах.— Черногоровка, 1978.— С. 57.
9. Сильвестров В. В., Урушкин В. П. Детонация трубчатых зарядов ВВ в жидком водороде // ФГВ.— 1977.— 13, № 1.— С. 78.
10. Кондриков Б. Н. Детонация.— М.: МХТИ, 1980.— С. 21.

г. Москва

Поступила в редакцию 15/V 1990,
после доработки — 5/VI 1991

УДК 621.787.044

В. А. Симонов

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ОБЛАСТИ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

Приведены экспериментальные данные, ограничивающие максимальные значения основных параметров верхней границы области сварки и кривой B . Существование этих ограничений связывается с величиной сдвиговой деформации на контактирующих поверхностях.

Ограничение максимальных значений скорости точки контакта скоростью звука c_0 можно рассматривать как один из первых критериев волнообразования при косых соударениях поверхностей металлических тел [1—3]. Согласно этому критерию, образование волн возможно при скорости точки контакта $v_k < c_0$, а так же в области $v_k > c_0$, если угол соударения γ больше критического $\gamma_{кр}$, определяемого сжимаемостью металлов [4]. По известным уравнениям состояния в [2, 5] рассчитаны кривые $\gamma_{кр} = f(v_k)$ (где $v_k > c_0$), определяющие границу дозвуковых соударений. Как показали расчеты, у большинства практически важных сочетаний металлов $\gamma_{кр} \leq 10^\circ$ при $v_k \leq 6000$ м/с. Эти результаты использованы в классификации течений на плоскости (v_k, γ) [6] для определения кривой B в качестве одной из границ области сварки.

Результаты экспериментального построения областей сварки сочетаний алюминий — алюминий [7], медь — медь [8], сталь — сталь [9] и сталь — медь [10] показывают, что условия образования волн и равнопрочности соединений не выполняются и в дозвуковых режимах соударений. Критические значения $v_k \approx 3300$ м/с достигаются при $\gamma = 5 \div 7^\circ$. Фактически прямолинейный участок нижней границы переходит в кривую B , положение которой на плоскости (v_k, γ) не связано с c_0 .

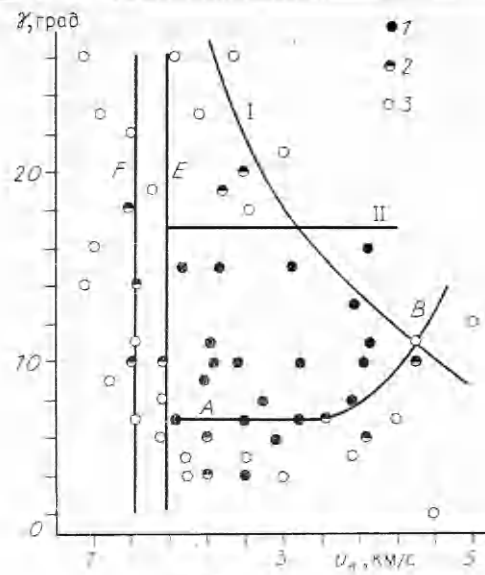


Рис. 1. Плоскость (v_{κ} , γ).

1 — сварка; 2 — частичная сварка; 3 — сварки нет.

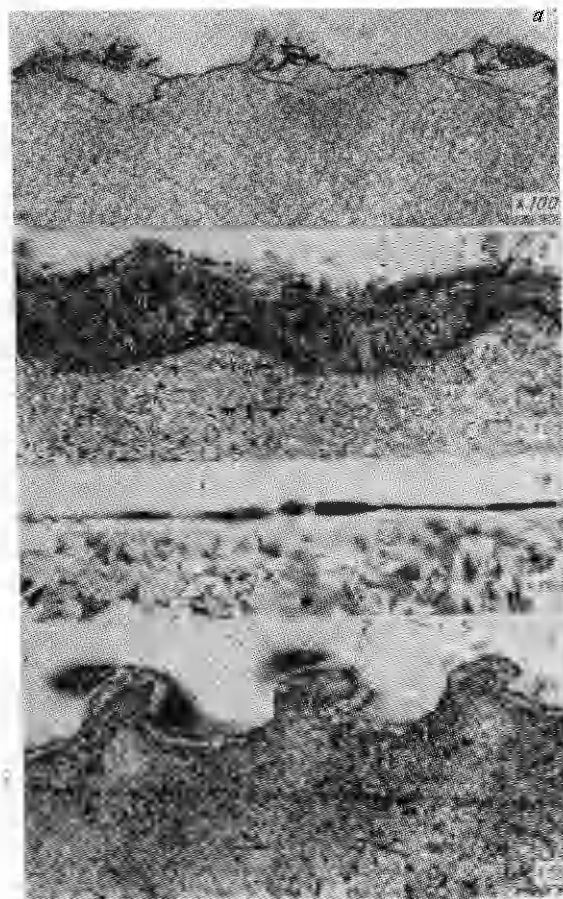


Рис. 2. Микроструктуры соединений на границе B.

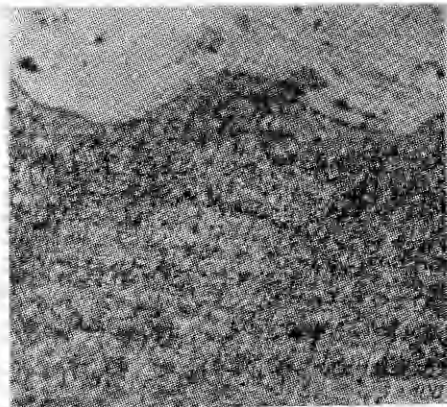


Рис. 3. Адиабатические сдвиги в Ст. 3.

Для выяснения причин несоответствия расчетных и опытных данных о положении кривой B рассмотрим особенности течения металлов в зоне контакта на примере области сварки сочетания Ст. 3 — нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Постановка опытов приведена в [8], а их результаты представлены на рис. 1 в виде точек плоскости (v_k, γ) . неподвижные пластины Ст. 3 имели размеры $260 \times 80 \times 27$, метаемые — $300 \times 100 \times 5$ мм. Соединение считалось равнопрочным, если средняя по площади сварки прочность на отрыв плакирующего слоя была не меньше 350 МПа. Начало схватывания — прямая F , соответствует критической минимальной скорости $v_k = 1450 \pm 180$ м/с. Образование волн стабилизируется при $v_k = 1760 \pm 120$ м/с. Нижняя граница — прямая A , определяется углом $\gamma = 7^\circ$.

Экспериментальная кривая B разделяет положительные и отрицательные результаты опытов в дозвуковой области изменения v_k . Для $\gamma = 7^\circ$ критическое значение $v_k = 3200$ м/с. В этом режиме при отсутствии волн на контактной границе возникают периодические расплавы (рис. 2, а), расстояние между которыми примерно в 1,5 раза меньше длины волны. Средняя прочность $\bar{\sigma} = 420$ МПа. Увеличение v_k на 200 м/с приводит к образованию сплошного расплавленного слоя в Ст. 3 (рис. 2, б) толщиной 120 мкм, $\bar{\sigma} = 180$ МПа. Справа от кривой B при $\gamma = 7^\circ$ и $v_k = 4200$ м/с расплавленный слой толщиной 60 мкм возникает в нержавеющей стали (рис. 2, в), $\bar{\sigma} = 20$ МПа. Для той же скорости метаемой пластины $v_0 = 520$ м/с увеличение γ на 1° обеспечивает выполнение условия равнопрочности — $\bar{\sigma} = 410$ МПа, а контактная граница становится волнообразной (рис. 2, г). Эти изменения структуры шва и прочности сварки при прямом и обратном переходах через кривую B остаются характерными для всех предельных режимов, приведенных на рис. 1.

Дополнительным структурным признаком критических режимов слева от границы B является появление периодических полос, наклоненных под углом к контактной поверхности (рис. 3). Это свидетельствует об изменении механизма сдвиговой деформации от однородной в объеме к локализованной в узких полосах адиабатического сдвига [11].

Из соотношений, связывающих основные кинематические параметры косых соударений v_0 , v_k и γ [12] следует, что с ростом v_k при $\gamma = \text{const}$ возрастает кинетическая энергия метаемой пластины. В условиях, когда волны не образуются, большая часть этой энергии выделяется в виде тепла в более узком по сравнению с размерами волн поверхностном слое, температура в котором превышает температуру плавления. Последующее охлаждение расплава приводит к образованию усадочных пор на площади, соизмеримой с площадью сварки.

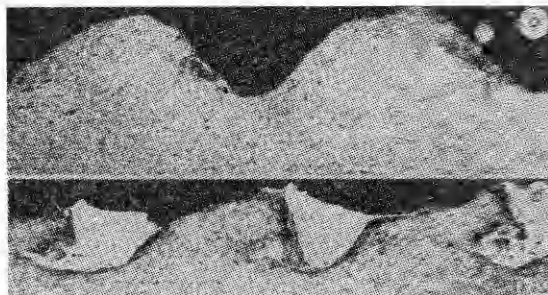
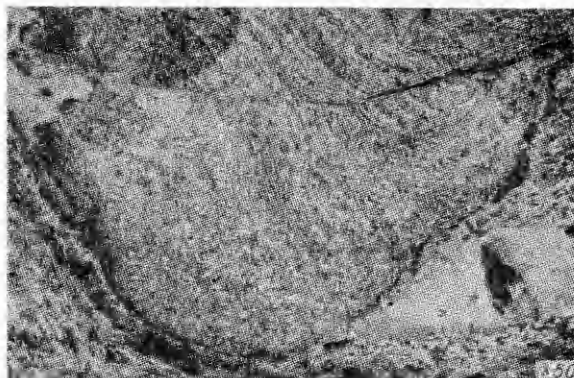


Рис. 4. Разрушение соединений на верхней границе.

Рис. 5. Продольный адиабатический сдвиг в нержавеющей стали.



Прочность соединения снижается до нуля. Отсюда следует, что положение границы B должно изменяться в зависимости от теплопроводности свариваемых металлов. Это подтверждается опытами по сварке стали с медью [13]. Кривая B смещается вправо до $v_k = 3900$ м/с при $\gamma = 6^\circ$. Соединение образуется через тонкий расплав в безволновом режиме, благодаря интенсивному отводу тепла в медный слой.

Таким образом, положение границы B в дозвуковой области изменения v_k обусловлено резким уменьшением размеров зоны пластического течения и, как следствие, концентрацией тепла на контактирующих поверхностях.

Верхняя граница области сварки (рис. 1, I) обычно связывается с образованием расплавов на контактной границе и действием растягивающих напряжений [14]. Ее положение на плоскости (v_k, γ) определяется скоростью v_0 , толщиной метаемой пластины δ_1 и тепловыми характеристиками свариваемых металлов [15]. Вместе с тем, в классификации течений [6] она отсутствует.

Как видно на рис. 1, II условие равнопрочности перестает выполняться при $\gamma \geq 18^\circ$ при этом локальная прочность может превышать 400 МПа. Если $\gamma > 21^\circ$, то $\bar{\sigma} = 0$. Характерные особенности околошовной зоны приведены на рис. 4. Представляется неожиданным существование двух видов разрушения соединения. Вблизи прямой E (см. рис. 1) метаемая и неподвижная пластины разделяются после соударения по волнообразной контактной границе (рис. 4, a), следы плавления не обнаруживаются. При $v_k > 2400$ м/с плакирующий слой срезается по гребням волн, так что нержавеющая сталь остается во впадинах (рис. 4, b). Выявление на шлифах структуры стали 12Х18Н10Т позволяет обнаружить узкие бесструктурные полосы, соединяющие вершины волн (рис. 5). Это свидетельствует о концентрации тепловыделения в продольных полосах адиабатического сдвига, по которым и происходит разрушение, несмотря на наличие расплавов в шве. Принципиальное несоответствие кривой I рис. 1 и результатов опытов, возможно, связано с тем, что в физическом обосновании критерия верхней границы [14] не учитывалась вероятность появления таких структурных дефектов.

Существование предельных $\gamma = 18^\circ$ для сочетаний Ст. 3 — 12Х18Н10Т и алюминий — алюминий при δ_1 , равных 3 и 4 мм соответственно, следует из анализа приведенных в [16] зависимостей $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\alpha)$, где α — начальный угол. Для композиций медь — медь [16, 8] и сталь — медь [16, 13] условие равнопрочности выполняется при $\gamma = 30^\circ$. В то же время в [17] отмечается, что в точке $v_k = 1000$ м/с и $\gamma = 40^\circ$ медные пластины не соединяются.

Полученные результаты позволяют рассматривать прямую $\gamma = 17^\circ$ как верхний предел степени деформации, обеспечивающей выполнение условия равнопрочности соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрахамсон Г. Р. Остаточные периодические деформации поверхности под действием перемещающейся струи // Тр. Америк. о-ва инж.-мех. Сер. Е. Прикл. механика.— 1961.— 28, № 4.— С. 45—55.
2. Cowan G. R., Holtzman A. H. Flow configurations in colliding plates: explosive bonding // J. Appl. Phys.— 1963.— 34, № 4.— P. 928—939.
3. Дерибас А. А., Кудинов В. М., Матвеевков Ф. И. Влияние начальных параметров на процесс волнообразования при сварке металлов взрывом // ФГВ.— 1967.— 3, № 4.— С. 561—568.
4. Walsh J. M., Shreffler R. G., Willing F. J. Limiting conditions for jet in high velocity collisions // J. Appl. Phys.— 1953.— 24, N 3.— P. 349—359.
5. Кузьмин Г. Е., Яковлев И. В. Исследование соударений металлических пластин со сверхзвуковой скоростью точки контакта // ФГВ.— 1973.— 9, № 5.— С. 746—753.
6. 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.— С. 27—43.
7. Loyer A., Hay D. R., Cagnon G. Weldability windows and the selection of explosive welding process parameters // 5th Int. Conf. of HERF, Denver, 1975.— P. 4.3.1—4.3.14.
8. Симонов В. А. О форме нижней границы области сварки взрывом // ФГВ.— 1990.— 26, № 4.— С. 132—136.
9. Симонов В. А. О критерии схватывания металлов при сварке взрывом // Там же.— 1991.— 27, № 1.— С. 127—130.
10. Захаренко И. Д., Злобин Б. С. Влияние твердости свариваемых материалов на положение нижней границы сварки взрывом // Там же.— 1983.— 19, № 5.— С. 170—174.
11. Могилевский М. А., Санчаа Т. О., Шипкин Ю. Д. Критические параметры нагружения для развития адиабатического сдвига в титане // ПМТФ.— 1986.— № 3.— С. 118—120.
12. Дерибас А. А., Кудинов 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.
13. Симонов В. А. Сравнение нижних границ области сварки двух композиций на основе стали, Новосибирск, 1986; Сб. докл.— Новосибирск, 1986.— С. 313—316.
14. Захаренко И. Д. Критические режимы при сварке взрывом // ФГВ.— 1972.— 8, № 3.— С. 422—428.
15. Ефремов В. В., Захаренко И. Д. К определению верхней границы области сварки взрывом // Там же.— 1976.— 12, № 2.— С. 255—260.
16. Седых В. С., Бондарь М. П. Основные параметры сварки взрывом и прочностные характеристики сварных соединений // Свароч. пр-во.— 1963.— № 2.— С. 1—5.
17. Уткин А. В., Дремин А. И., Михайлов А. И. и др. Особенности волнообразования при больших углах соударения металлических пластин // ФГВ.— 1982.— 18, № 2.— С. 104—110.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 12/III 1991