

фронта ДВ. Можно надеяться, что совершенствование используемой методики, в частности уменьшение длительности просвечивающего импульса, позволит выявить детали течения ПД в области, примыкающей к фронту.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Rivard, Wenable, Fickett. Fifth Symp. (Intern.) on Detonation.— Pasadena, 1970.
2. Davis W. C., Venable D. Ibid.
3. Дорохин В. В., Зубарев В. Н., Орехин Ю. К. и др. ФГВ, 1985, 21, 4, 100.
4. Зубарев В. Н., Панов Н. В., Орехин Ю. К. БИ, 1985, 3, 210.
5. Li H., Huang Z., Ding J. Eighth Symp. (Intern.) on Detonation.— New Mexico, 1985.
6. Зубарев В. Н. ПМТФ, 1965, 2, 55.
7. Жерноклетов М. В., Зубарев В. Н., Телегин Г. С. ПМТФ, 1969, 4, 127.

Поступила в редакцию 20/VI 1986

### ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ СВЯЗИ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ МЕДНЫХ ПЛАСТИН

*М. П. Бондарь, В. М. Оголихин*

*(Новосибирск)*

Образование соединения при сварке взрывом определяется совместной пластической деформацией соударяемых поверхностей, за счет которой создается физический контакт и поверхностные слои приводятся к энергетическому состоянию, обуславливающему атомное взаимодействие свариваемых материалов.

Деформационные процессы при сварке взрывом исследовались в [1—4]. В [4] показано, что пластическая деформация от поверхности свариваемой заготовки к плоскости соединения растет неравномерно. На некотором расстоянии от плоскости соединения наступает интенсивный рост деформации. Для определенности место скачка в [5] связывали с расстоянием, где деформация достигала 100%.

Какими должны быть размер и структура области интенсивной пластической деформации для обеспечения качественной прочности соединения и как эти характеристики связаны с кинематическими параметрами сварки взрывом ( $\gamma$  — угол соударения,  $v_k$  — скорость точки контакта)? Эти вопросы явились предметом исследования настоящей работы. Кроме того, было исследовано влияние степени шероховатости свариваемых поверхностей на изменение соотношения между размером, структурой исследуемой зоны и параметрами соударения, определяющими образование прочной связи. Исследования проводили на меди, так как в этом металле, как показано в [4], можно измерить деформацию с большой точностью вблизи плоскости соединения с помощью двойников, не нарушая сплошности материала. Кроме того, благодаря высокой пластичности меди величина зоны измерима практически при всех режимах соударения, когда возможно образование соединения даже при нулевой прочности.

Сварка взрывом проводилась по несимметричной схеме соударения. Исходные медные пластинки имели площадь  $60 \times 200$  мм, толщины неподвижных пластин 10, метаемых — 5 мм. Выбор толщины метаемых пластин основан на идентичности размера зоны интенсивной пластической деформации в обеих свариваемых пластинах. Пластины перед сваркой отжигали при  $1050^\circ\text{C}$  4 ч. В результате термообработки размеры зерен в пластинах составляли несколько миллиметров и содержали большое число двойников, с помощью которых измеряли деформацию.

Свариваемые поверхности обработаны по трем классам: фрезерованные —  $R_z = 13 \div 20$  мкм, шлифованные  $R_z = 3 \div 6$  мкм, полированные

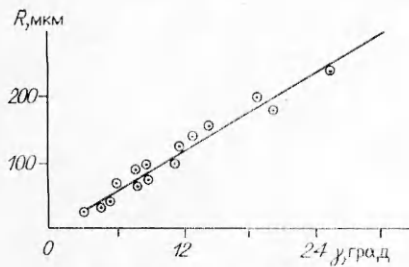


Рис. 1. Зависимость  $R(\gamma)$ .

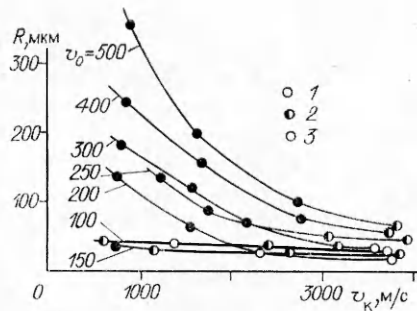


Рис. 2. Зависимость  $R(v_k)$ .

$R_z < 1$  мкм. Режимы соударения изменялись в пределах  $v_k = 700 \div 4000$  м/с,  $\gamma = 3 \div 30^\circ$ . Из каждой сваренной заготовки вырезали два шлифа (из центральной части и из середины второй половины заготовки в направлении процесса сварки) и делали два образца для измерения прочности на отрыв  $\sigma_B$ . По шлифам измерялась ширина зоны интенсивной пластической деформации  $R$  и исследовалась структура. С этих же шлифов снимались тонкие срезы для исследования структуры в электронном микроскопе на просвет. Результаты измерения  $R$  в заготовках, сваренных из пластин с фрезерованными поверхностями, представлены на рис. 1, 2 в виде зависимостей  $R(\gamma)$  и  $R(v_k)$ . Каждая точка — среднее значение, полученное не менее чем из трех сваренных заготовок. На рис. 2 точки 1—3 представляют значения прочности на отрыв, 1 соответствует  $\sigma_B \geq \sigma_B^0$ , 2 —  $0 < \sigma_B < \sigma_B^0$  и 3 — нулевой прочности соединения (здесь  $\sigma_B^0$  относится к исходному материалу).

Из рис. 1 видно, что между  $R$  и  $\gamma$  существует практически линейная связь, а зависимости  $R(v_k)$  (см. рис. 2) представляются кривыми, характеризуемыми постоянным значением  $v_0$  — скорости метания. Такими же кривыми изображается обычно графическая зависимость  $\gamma(v_k)$ . Указанные значения прочности отождествляют границы сварки в координатах  $R$ ,  $v_k$  и  $\gamma$ ,  $v_k$ , приведенные в [6] для меди. Соединения имеют нулевую прочность при  $R < 40$  мкм, что соответствует углам  $\gamma \sim 5^\circ$ . Неустойчивая прочность определяется интервалом  $40 < R < 70$  мкм ( $5 < \gamma < 10^\circ$ ). При  $R \geq 70$  мкм получается качественное соединение —  $\sigma_B \geq \sigma_B^0$ .

С целью изучения возможности изменения соотношения между  $R$ , определяющей качество связи при сварке взрывом, и параметрами  $\gamma$ ,  $v_k$  за счет качества обработки соударяемых поверхностей проведены сравнительные эксперименты для трех классов обработки. Условия и результаты экспериментов представлены в таблице. Выбранные значения углов  $\gamma$  соответствовали  $R$ , принадлежащим области нулевой и неустойчивой прочности, минимальные значения  $v_k$  — переходному режиму от гладкой к волновой границе соединения. Измеренные значения  $R$  при постоянном  $\gamma$  имели одинаковые значения, не зависящие ни от качества обработки поверхностей соударения, ни от  $v_k$ . Уменьшение шероховато-

$R_z$ , мкм	$\sigma_B$ , МПа				
	$\gamma=5^\circ, R=30$ мкм и $v$ (м/с)			$\gamma=7^\circ, R=40$ мкм, $v_k=1100$ м/с	$\gamma=10^\circ, R=60$ мкм, $v_k=1100$ м/с
	1200*	2400	3200		
12—30	0 (20—200)	0—300	0—270	0	160—240
3,2—6,3	160—190 (160—180)	160—240	160—240	0—230	230—250
<1	0—270 (0—230)	0—260	0—300	0—240	0—260

\* Цифры в скобках — отжиг  $400^\circ\text{C}$ .

сти соударяемых поверхностей несколько изменило область сварки. Так, образцы с исходными фрезерованными поверхностями, сваренные при  $\gamma = 5$  и  $7^\circ$  и  $v_k = 1200$  и  $1100$  м/с, имеют нулевую прочность, а со шлифованными и полированными поверхностями ипадают в область неустойчивой прочности. Такие же изменения происходят и за счет повышения  $v_k$ . Улучшение качества соударяемых поверхностей при  $\gamma = 10^\circ$  также определило некоторое повышение прочности связи.

Следует отметить особенность, характерную для заготовок, сваренных из полированных пластин. Независимо от приведенных в таблице режимов соударения образцы для механических испытаний из половины заготовки, принадлежащей началу процесса сварки, имели нулевую прочность.

Исследование структуры показало качественную разницу между образцами с  $R \geq 70$  и  $R < 70$  мкм. В первых измерить деформацию у шва или определить точное его положение невозможно, так как в центре зоны интенсивной пластической деформации образуется полоса с качественно новой структурой, неразрешимой в оптическом микроскопе, в которой границы исходной структуры, в том числе двойников, теряются. Толщина этой полосы с ростом суммарной зоны интенсивной деформации  $2R$  от 140 до 700 мкм изменяется от 15–20 до 60 мкм, максимальная сдвиговая деформация, измеренная на ее границах, достигала 1000%. Структура полосы, исследованная в электронном микроскопе на просвет, характеризуется полосчатостью (рис. 3). Причем ширина полос у краев зоны достигает  $(1-10) \cdot 100 \text{ \AA}$ , по мере приближения к центру ширина их увеличивается, а в центре появляются четко очерченные блоки без видимой преимущественной ориентировки (рис. 3, а–в). Однако электронограммы этих мест существенно не отличаются. Дифракционная картина, приведенная на электронограмме (рис. 3, г), показывает увеличенное число рефлексов, что свидетельст-

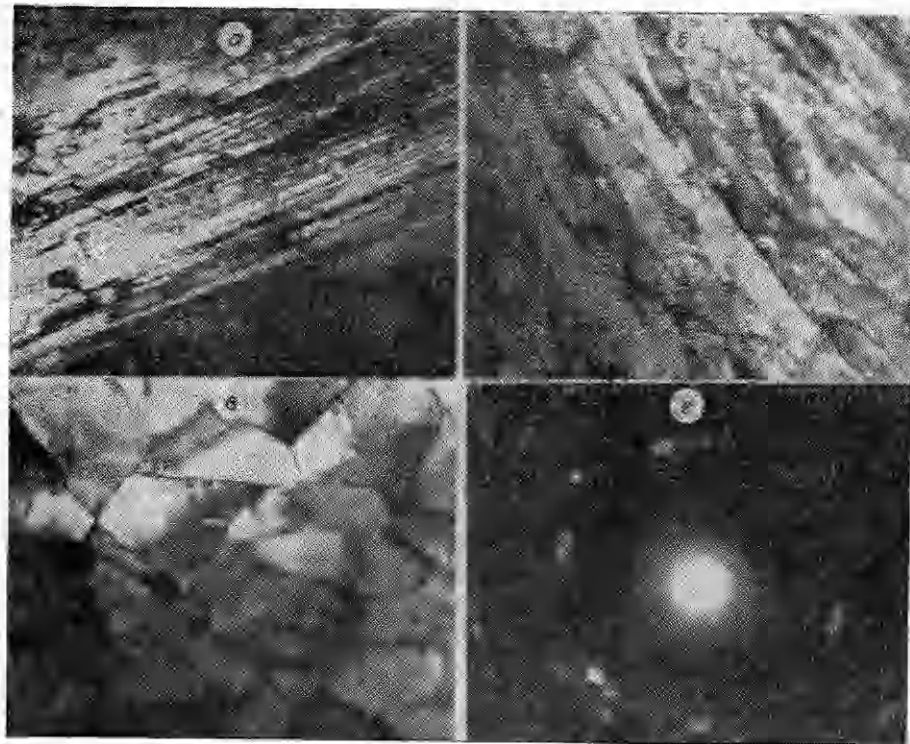


Рис. 3. Зона соединения с качественно новой структурой.

а) структура начала зоны,  $\times 27\,500$ ; б) структура переходного слоя,  $\times 27\,500$ ; в) структура центра зоны,  $\times 27\,500$ ; г) электронограмма с центральной зоны.

вует о диспергировании структуры и разориентации блоков и фрагментов относительно друг друга; интегральный угол разориентации  $\sim 20^\circ$ .

Структура образцов с  $R < 70$  мкм, попадающих в область неустойчивой прочности, характеризуется наличием полосы расплава вдоль соединения, которая хорошо видна в оптическом микроскопе. Общее количество расплава растет с повышением  $v_k$ . Образцы нулевой прочности ( $R = 30$  мкм), сваренные при  $\gamma = 5^\circ$  и  $v_k = 1200$  м/с из пластин с фрезерованными поверхностями, имеют в зоне соединения микронесплошности и нерегулярную границу соединения. Увеличение  $v_k$  до 3200 м/с при сохранении  $\gamma$  переводит их в область неустойчивой прочности и при этом микронесплошностей в соединении не наблюдается, граница соединения имеет волновую форму. Подобные результаты получены за счет улучшения качества поверхности. Образцы, сваренные из пластин со шлифованными и полированными поверхностями при  $\gamma = 5^\circ$  и  $v_k = 1200$  м/с, микронесплошностей в границе соединения не имеют и по механическим свойствам попадают в область неустойчивой прочности.

Из приведенных результатов видно, что ширина области интенсивной пластической деформации в зоне соединения  $R$  при сварке взрывом пластин одинаковой толщины находится в прямой зависимости от угла соударения и при постоянном  $\gamma$  не зависит от  $v_k$ . Скорость точки контакта определяет давление при соударении  $\left( p = \frac{\rho v_k^2}{2}, \rho \text{ — плотность}$

материала) и, следовательно, уровень напряжения, от которого должен зависеть характер деформации соударяемых пластин. Отсутствие зависимости  $R(v_k)$  при  $\gamma = \text{const}$  свидетельствует об особом поведении материала в окрестности поверхности соударения. Это подтверждается и характером структурного состояния объема материала, включающего плоскость соединения (см. рис. 3).

При  $R > 70$  мкм четкой границы между соединяемыми поверхностями не обнаруживается, она заключена в объеме, имеющем качественно новую структуру. Ярко выраженная полосчатость структуры у краев этого объема (см. рис. 3, а) свидетельствует о сдвиговом характере деформации, расстояние между полосами сдвига  $(1-10) \cdot 100 \text{ \AA}$ . Этот размер должен уменьшаться при приближении к срединной плоскости соединения, так как градиент скорости деформации после скачка растет [5]. Наблюдаемое увеличение ширины полос (см. рис. 3, б) определено процессами, сопутствующими деформации. Это связано с тем, что при уменьшении расстояния между полосами сдвига степень структурной неравновесности растет. Так, в [7] показано, что при размерах фрагментов  $\sim 100$  атомов (это тождественно расстоянию между полосами у края объема) дифракционная картина принимает такой вид, который соответствует более аморфному состоянию, чем кристаллическому. Степень неравновесности (аморфизации) будет увеличиваться с уменьшением расстояния между полосами сдвига при приближении к плоскости соединения. Нестабильность этого структурного состояния и тепло, выделяемое за счет большой пластической деформации, создают условия для динамической рекристаллизации. Исходя из сказанного, конечная структура (см. рис. 3, б, в), включающая плоскость соединения, не противоречит тому, что деформация в пришовной зоне осуществляется путем сдвигов и что частота сдвигов растет при приближении к шву. При  $R < 70$  мкм происходит локализация энергии в малых объемах, а также наблюдаются расплавы, толщина которых увеличивается с ростом  $v_k$ .

Таким образом, найденные экспериментальные зависимости и характер структуры в зоне соединения показывают, что условия нагружения при сварке взрывом приводят к сдвиговой неустойчивости материал в приконтактной зоне, обеспечивающей поведение, подобное идеальной несжимаемой жидкости.

Если ширина области интенсивной пластической деформации при сохранении толщин соударяемых пластин определяется  $\gamma$ , то величина

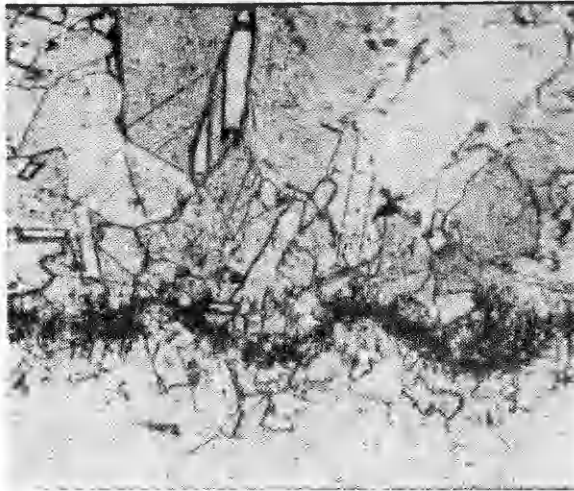


Рис. 4. Рекристаллизованная структура образца, сваренного из пластин со шлифованными поверхностями при  $\gamma = 5^\circ$  и  $v_k = 1200$  м/с.

к образованию физического контакта. Вероятно, значения  $R_z = 12 \div 20$  мкм соизмеримы с  $R$ , а давление недостаточно, чтобы произошла необходимая для образования контакта деформация в большом объеме, в результате вдоль соединения образуются микронесплошности. Увеличение скорости до 2400 и 3200 м/с при том же  $\gamma$  повышает давление до 25,6 и 45,5 ГПа соответственно. Это приводит к созданию больших деформаций в объеме соударяемых пластин, граница соединения становится волновой, микронесплошностей вдоль границы соединения не образуется, прочность соединения повышается от 0 до 160—180 МПа. Для шлифованных и полированных пластин физический контакт создается за счет деформации в области  $R$ .

Структура зоны соединения, зависящая от  $R$ , определяет прочность связи при сварке взрывом. Область  $40 < R < 70$  мкм, обеспечивающая неустойчивость связи, характеризуется наличием непрерывной тонкой полосы расплава ( $\sim 1-5$  мкм при  $\gamma = 5 \div 7^\circ$ ) вдоль соединения. В этом случае взаимодействие на границе осуществляется через жидкую фазу, кристаллизация которой приводит к созданию большого числа микро-раковин, что и определяет соотношение  $\sigma_b < \sigma_b^0$ . Микро-раковины четко видны после рекристаллизационного отжига при  $T = 400^\circ\text{C}$  (рис. 4), который, как видно из таблицы, не привел к повышению прочности образцов, где был физический контакт (шлифованные и полированные пластины), а увеличил прочность за счет спекания у образцов, где не было достаточного физического контакта (фрезерованные пластины). Высокая прочность соединения при  $R \geq 70$  мкм определена особым структурным состоянием зоны соединения, обуславливающим взаимодействие не по границе твердое — жидкое — твердое состояние, как в случае наличия расплава, а в твердом состоянии в некотором объеме с качественно новой структурой. Деформационная структура в этом объеме, как показано выше, характеризуется высокой фрагментацией и по энергетическому состоянию ближе к аморфному, чем к кристаллическому. Нестабильность этого структурного состояния определяет высокую подвижность атомов, необходимую для реализации связи в твердом состоянии [8], в частности для кристаллографической подстройки свариваемых поверхностей. Этот эффект можно видеть на рис. 3, б, в, где в результате деформационного структурного состояния и тепла, сопровождающего большую деформацию, сформировалась новая структура.

На ширину зоны интенсивной пластической деформации при сварке взрывом не влияет степень шероховатости свариваемых поверхностей. Она должна учитываться при выборе  $v_k$ , определяющим давление, которое обеспечивает физический контакт, что показано в [9].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Годунов С. К., Дерibas А. А., Захаренко И. Д. и др. ФГВ, 1971, 7, 1.
2. Кривенцов А. Н., Седых В. С. Физика и химия обработки материалов, 1969, 7.
3. Hammerschmidt M., Kreye H. Shock Waves and High — Strain — Rate Phenomena in Metals.— N. Y.; L.: Plenum Press, 1980.
4. Бондарь М. П., Оголихин В. М. ФГВ, 1985, 21, 2.
5. Bondar M. P., Ogolikhin V. M. Internat. Conf. on Mechanical and Physical Behaviour of Materials Under Dynamic Loadings.— Paris, 1985.
6. Симонов В. А., Оголихин В. М. VI Междунар. симп. по обработке материалов взрывом.— Готвальдов, ЧССР, 1985.
7. Hoare M. R., Pal P. Adv. Phys., 1975, 24, 645.
8. Oberg A., Martenson N., Schveitz Y. A. Metallurg. Transactions, 1985, 16A, 5.
9. Добрушин Л. Д. Автомат. сварка, 1979, 6.

*Поступила в редакцию 28/VIII 1986,  
после доработки — 15/XII 1986*

### ДОПЛЕРОВСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ МИШЕНЕЙ, УСКОРЯЕМЫХ ВЗРЫВОМ, НА ОСНОВЕ ЙОДНОГО ЛАЗЕРА

*Г. Б. Власова, А. Л. Михайлов, Б. А. Поклонцев, А. В. Федоров  
(Москва)*

Лазерные, в том числе доплеровские, методы находят все более широкое применение в исследовании газодинамических процессов. Для изучения движения контактных и свободных границ тел в условиях взрыва в настоящее время применяются в основном два типа таких измерителей — интерферометр сдвига [1] и дифференциальный интерферометр скорости [2, 3]. Эффективность и ограничения применения этих методов определяются условиями протекания исследуемых процессов. Для измерителей первого типа существует верхний предел измеряемых скоростей. Он определяется, в основном, частотой зондирующего излучения и частотными характеристиками регистрирующей аппаратуры ( $\Delta\nu \sim 10^9$  Гц) и для лазерного излучения видимого диапазона составляет  $\sim 500$  м/с.

Измерители второго типа имеют ограничение по величине ускорения изучаемого объекта, что затрудняет их применение в исследовании ударно-волновых явлений. Оба метода чувствительны к степени пространственной когерентности зондирующего излучения, что осложняет их использование для изучения процессов, связанных с диффузным рассеянием света. Кроме того, регистрация доплеровского сигнала в этих измерителях основана на определении интенсивности светового сигнала фотоприемником (ФЭУ, фотодиод), что делает их чувствительными к изменениям отражательной способности или индикатрисы рассеяния зондируемых поверхностей, практически неизбежным в экспериментах с ударными волнами заметной интенсивности.

Эти и другие недостатки интерферометров, построенных по схеме Майкельсона, по-видимому, и ограничили их применимость в ударно-волновых исследованиях в основном областью эффектов упругого поведения материалов.

В работах [4—6] описан лазерный доплеровский метод измерения скоростей с применением в качестве селектора частот интерферометра Фабри — Перо (ИФП). Этот метод свободен от всех ограничений, присутствующих указанным выше системам. Настоящая работа развивает систему [4] с целью создания непрерывного доплеровского измерителя скорости для газодинамических экспериментов.

Оптическая схема установки приведена на рис. 1. Источник зондирующего света — фотодиссоционный лазер *I* на  $C_3F_7I$  ( $\lambda = 1.315$  мкм) излучает импульс длительностью  $\sim 5$  мкс с максимальной мощностью  $\sim 2 \cdot 10^9$  Вт. Применение мощного импульсного лазера практически снимает вопросы, связанные с изменениями отражательной способности