

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, С. И. Когарко, Н. Н. Симонов. ЖТФ, 1956, 26, 8, 1744.
2. А. Н. Дремин и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
3. R. A. Strehlow, A. A. Adameczyk, R. J. Stiles. Astr. Acta, 1972, 17, 4—5, 509.
4. J. H. Lee, H. Matsui. Comb. Flame, 1977, 28, 61.
5. H. Matsui, J. H. Lee. 17-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, Pa: Combust. Inst., 1978.
6. R. Knystautas, J. H. Lee, C. M. Guirao. Comb. Flame, 1982, 48, 63.
7. Л. В. Овсянников. Лекции по основам газовой динамики. М.: Наука, 1981.
8. А. А. Васильев, В. В. Григорьев. ФГВ, 1980, 16, 5.
9. Ю. А. Николаев, М. Е. Топчийн. ФГВ, 1977, 13, 3.
10. А. А. Васильев. ФГВ, 1983, 19, 1.

О ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ПЛАКИРОВАНИИ ВЗРЫВОМ

М. П. Бондарь, В. М. Оголихин

(Новосибирск)

1. Одним из факторов, определяющих образование надежного соединения при плакировании взрывом, является совместная пластическая деформация соударяющихся поверхностей [1—5].

В работе [1] для определения деформации в зоне соединения использован метод «касательных сеток». Сетку наносили на полированные и протравленные грани образцов с помощью микротвердомера ПМТ-3. Исходные сетки фотографировали перед запрессовкой образцов в колодцы, выфрезерованные в центральной части соединяемых пластин. После плакирования образцы извлекали из пластин, вновь фотографировали и по линейным и угловым искажениям ячеек сетки определяли деформацию сдвига. В работе получена зависимость величины «смещения» материала в направлении сварки взрывом x от расстояния до шва y в виде

$$x = x_0 \exp(-B\sqrt{y}). \quad (1)$$

Кроме того, установлена зависимость прочности соединения от величины деформации в зоне соединения.

В работе [2] для определения смещения металла в направлении перемещения точки контакта применена методика, по которой в металлической пластине просверливают отверстие, а в неподвижной фрезеруют канавку, в которые запрессовывают проволоку и соответствующую вставку из материала пластин. Для четкого выявления границы раздела вставку запаивают медью или серебряным припоем с толщиной запайки, не превышающей 0,05 мм. По микрошлифам, вырезанным из сваренных пластин, определяли смещение. Величину смещения вблизи линии соединения не определяли. Зависимость смещения материала в направлении процесса сварки от расстояния до линии соединения, установленная в данной работе, несколько отличается от (1) и имеет вид

$$x = x_0 \exp(-By). \quad (2)$$

В [3] использовалась методика, подобная [2]. Общий недостаток приведенных методик — нарушение сплошности материала при установке меток, приводящее при последующем соударении к некоторой нерегулярности течения в местах их расположения и, следовательно, затрудняющее определение смещений вблизи соединения, которые играют основную роль в образовании связи между соударяемыми поверхностями.

В настоящей работе для определения пластической деформации в зоне соединения при плакировании взрывом предложен метод измерения деформации в зоне соединения по изменению направления и сечения двойников в материале соударяемых пластин.

v_0 , м/с	v_k , м/с	r , мм	γ , %	λ	a	σ_b , МПа	H_v , МПа
320	900	0,2	1000	3,4	1,1	340—290	1390—1230
	1500	0,1	500	1,5	0,43	330	1350
	2600	0,02	200	0,8	0,23	315	—
400	920	0,6	240	4,5	—	360—340	1390—1360
	1520	0,2	500	2,4	0,7	336	1390
	2640	0,08	150	0,8	0,25	330	—
500	930	0,75	300	7,3	—	340	1340—1230
	1530	0,26	300	2,5	0,52	340—330	1230
	2520	0,06	400	1,6	0,41	330—240	—

В качестве материала исследования использовалась медь марки М1. Были изготовлены пластины с толщинами 5 и 10 мм и площадью плакирования 190×90 мм². Пластины перед плакированием отжигали 3 ч в вакууме ($\sim 10^{-4}$ мм рт. ст.) при 1000°C. Структура после отжига была крупнозернистой с размером зерен в несколько миллиметров и с большим количеством двойников. Присутствие многочисленных двойниковых пластинок отжига с параллельными прямыми сторонами — типичная особенность рекристаллизованной структуры меди. Эти пластинки в меди всегда ограничены плоскостями (111) или когерентными границами. Объяснение происхождения многочисленных двойниковых пластинок отжига основано на том, что поверхностная энергия когерентной поверхности раздела составляет 5% от энергии обычной большеугловой границы [6]. Поэтому в процессе роста зерен при рекристаллизации при высоких температурах образуется большое число двойников в крупных зернах.

Плакирование проводили по схеме несимметричного соударения. В качестве неподвижных пластин использовали пластины толщиной 10 мм. Параметры соударения, приведенные в таблице (v_0 — скорость метания, v_k — скорость точки контакта), выбраны такими, что они укладываются в область сварки взрывом для меди.

Из центрального сечения плакированных заготовок вырезали по два шлифа длиной по 40 мм, исследуемые поверхности которых были параллельны направлению распространения плакирования. В микроструктуре образцов всегда имелось несколько зерен, где начальное направление двойников составляло с границей соединения углы $\sim 60-90^\circ$. По характеру искажения их формы и сечения можно было определить вид деформации в окрестности соединения пластин и ее величину. На рис. 1, а, б показаны двойники, входящие во «впадину» и «горб» волновой формы границы соединения, а на рис. 1, в — изменение формы двойников вдоль границы соединения. Величину сдвиговой деформации определяли по отклонению границы двойника, составляющего в исходном состоянии угол $60-90^\circ$ с поверхностью соударения, от касательной, проведенной к его начальному направлению. По шлифам определяли длину волны λ и ее амплитуду a в случае волновой границы соединения (см. таблицу), величину микротвердости вдоль границы соединения со стороны каждой пластины, а также в поперечном направлении сваренной заготовки. Кроме того, из сваренных заготовок вырезали по три образца с кольцевыми пазами, по которым определяли прочность соединения на отрыв.

2. Выбор толщины метаемой пластины, равной 5 мм, сделан в результате многочисленных экспериментов (опробованы пластины толщиной от 2 до 5 мм). После плакирования взрывом характер деформации верхней и нижней пластин отличался, если толщины метаемых пластин были равны 2—3 мм, при метании 5-миллиметровых пластин деформация относительно линии соединения была одинаковой.

Общая картина деформации материала в процессе плакирования представлена на рис. 1. Внутренние слои соударяемых пластин подверга-



Fig. 1.

ются сложной, существенно неоднородной деформации, особенно в случае волнообразной границы соединения. Направление полос деформации связано с направлением сдвигов. В местах действия больших сжимающих напряжений направление сдвигов всегда близко к 45° по отношению к направлению действия напряжений. Вблизи свободной поверхности происходит смещение материала на поверхность, направление сдвигов становится близким к направлению перпендикуляра к поверхности.

Для определенности описания деформации соударяемых пластин рассмотрим картину относительно неподвижной пластины и назовем область A (см. рис. 1, *в*) «впадиной», а область B — «горбом». На рис. 1 видно, что материал во впадине подвергается деформации сдвига со сжатием. Об этом свидетельствует изменение формы двойника 1 на рис. 1, *а* (направление развития процесса плакирования показано стрелкой) и направление полос сдвига в области A . В горбе материал находится в более сложном деформированном состоянии. Направление полос деформации в области B и характер деформации двойника 2, у которого при входе в горб уменьшилось поперечное сечение, указывают на то, что материал подвергнут деформации растяжения. При приближении к линии соединения направление и частота полос деформации указывают на большие деформации сдвига. Величина сдвиговой деформации вдоль линии соединения ($\gamma = x/y \cdot 100\%$) достигает максимальной величины во впадине. Это хорошо видно на рис. 1, *в*, где структурные границы приповерхностных слоев вследствие больших сдвигов теряются и двойника 3 не видно во впадине. Приведенные на рис. 1 микроструктуры показывают, что деформационное состояние при волнообразной границе соединения определено взаимодействием «бугра» деформации, образуемого перед точкой контакта с налетающей на него пластиной. При относительно малых скоростях точки контакта развивается симметричный «бугор». Для меди это характерно, так как в отожженном состоянии она не имеет четко выраженного предела текучести [7], его величина не превышает 20 МПа и, следовательно, материал испытывает деформацию при небольших напряжениях. Развитие «бугра» определяется временем, зависящим от соотношения v_k и c_τ (c_τ — скорость поперечных упругих волн). При больших v_k наблюдается несимметричность в картине «выпучивания бугра», резко обрываемом в направлении процесса сварки при столкновении с поверхностью налетающей пластины. Об этом можно судить по рис. 1, *в* по изменению формы двойника 2 и междвойниковой прослойки на горбе II, а также по изгибу двойника на рис. 1, *б*.

Деформации измеряли в обеих соударяемых пластинах в тех местах, где ее форма наиболее простая — сдвиг со сжатием. В принятых определениях эти места находятся под «впадинами» и над «горбами». Изменение величины смещения x от расстояния до шва y совпадает с формой изменения границ двойников, входящих в шов. Особенность этого процесса — существенное увеличение в степени роста смещения на некотором расстоянии от границы соединения r (см. таблицу). Для сравнения полученной в работе зависимости $x(y)$ с (1), (2) использовали графический метод представления результатов в полулогарифмической системе координат $\ln x - y$. В соответствии с (1) зависимость $\ln x - y$ представляется параболой (рис. 2, *б*), с (2) — гладкой прямой (рис. 2, *а*). Результаты, полученные в настоящей работе, описываются, как правило, ломаной (рис. 2, *в*), точка излома соответствует $y = r$. Характер этой кривой указывает на особенности в механизме деформации при приближении к зоне соединения. Работа продолжается как с целью выявления более точного описания зависимости $x(y)$, так и по исследованию тонкой структуры зоны соединения с целью изучения механизма деформации.

Расстояние r (см. таблицу), соответствующее координате точки перегиба на рис. 2, *в*, на котором происходит изменение характера деформации, имеет четко выраженную зависимость от параметров соударения. При равных значениях v_0 величина r тем больше, чем меньше v_k ; для близких значений v_k расстояние r растет вместе с v_0 . Такая же зависимость от

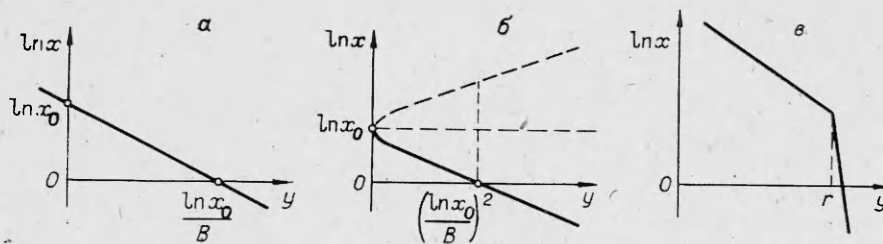


Рис. 2.

параметров соударения характерна для λ (длина волны) и a (амплитуда волны). Отмеченный характер влияния параметров соударения на r , λ и a указывает на их зависимость от величины напряжения при соударении, определяемого v_0 при равных толщинах метаемых пластин во всех экспериментах, а также от времени развития процесса. Чем меньше v_k , тем больше времени для развития деформаций; эффективность развития деформации определена близостью свободной поверхности перед точкой контакта. Известно, что в случае нагружения образцов ударными волнами большой амплитуды ($\sim n \cdot 10$ ГПа) по замкнутой схеме, ограничивающей деформацию, четко направленных сдвигов в структуре не наблюдается [8].

Характерная особенность полученных результатов заключается в том, что при зависимости r от v_k и v_0 величина сдвиговой деформации на расстоянии r от границы соединения γ имеет порядок $n \cdot 100\%$ для всех параметров соударения. Это подтверждает один из основных критериев сварки взрывом — необходимость развития интенсивного пластического течения на границе соединения металлов. Величина r определяет размер области интенсивной пластической деформации.

В работе не установлено связи между прочностью на отрыв σ_b и величиной деформации при соударениях. В таблице приведен разброс σ_b . Минимальное значение (244 МПа) получено для образцов, у которых отрыв произведен по шву. Близкие значения σ_b , видимо, можно объяснить как упрочнением в зоне соединения, так и тем, что по всему сечению плакированных пластин величина упрочнения соответствовала 80—90%. Об упрочнении можно судить по микротвердости H_v , измеренной вдоль границы соединения со стороны каждой из соударяемых пластин. Как видно из таблицы, значения H_v для образцов с $r > 0,61$ мм лежат в одной полосе разброса; $r < 0,1$ мм соответствуют образцам, у которых в зоне соединения появляются расплавы. Высокая температура в зоне расплава приводит к разупрочнению и, следовательно, уменьшению H_v . На периферии плакированных заготовок $H_v = 850 \div 950$ МПа, в исходном состоянии пластины $H_v = 480$ МПа.

Таким образом, использование предложенной методики измерения деформации вблизи границы плакирования позволяет выявить: вид деформации и его связь с формой границы соединения; величину деформации сдвига вблизи границы соединения; связь параметров соударения с величиной области интенсивной пластической деформации.

Поступила в редакцию 21/XII 1983,
после доработки — 9/II 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Кривенцов, В. С. Седых. Физ. и хим. обработка материалов, 1969, 1.
2. С. К. Годунов, А. А. Дерibas, И. Д. Захаренко и др. ФГВ, 1971, 7, 4.
3. Г. Г. Горанский, Р. В. Стефанович. — В кн.: Металлургия. Вып. 6. Минск, 1974.
4. В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев. Сварка взрывом в металлургии. М.: Металлургия, 1978.
5. M. Hammerschmidt, H. Kreye. Shock Waves and High — Strain — Rate Phenomena in Metals. N. Y. — L.: Plenum Press, 1980.
6. Дж. Е. Бурке, Д. Тернболл. Успехи физики металлов. Т. 1. М.: Металлургиздат, 1956.
7. Ю. Н. Работнов, С. Т. Милейко. Кратковременная ползучесть. Справочник. Новосибирск, 1964.
8. Н. В. Губарева, Т. М. Соболенко, Т. С. Тесленко. ФГВ, 1977, 13, 4.