

от давления сжатого азота. Расчет проведен по одномерному приближению, описанному выше. В исследуемом интервале давлений воздуха отличие эксперимента от расчета не превышает 100 м/с и, по-видимому, связано не только с различием в рабочих газах, но и с конечным временем раскрытия диафрагмы [7].

При изготовлении ударников и плоских мишеней по третьему классу точности измеренный перекосяк при соударении ударника с мишенью составил угол 0,6 мрад. Эксперименты проведены при давлении остаточного воздуха в стволе и камерах (см. рис. 1, 6, 7) 0,5 мм рт. ст. и давлении воздуха в пневматической системе привода ножа, разрушающего диафрагму, 5 МПа.

Анализ экспериментальных данных свидетельствует, что возникающие в процессе опыта вибрации в конструкции БУТ не влияют на результаты контактно-осциллографических измерений, а также измерений с помощью кварцевого, емкостного и манганинового датчиков.

*Поступила в редакцию
1/III 1977*

ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Набатов, В. В. Якушев. Проблемы прочности, 1975, 3.
2. В. Г. Петушков, Г. В. Степанов. Прикладная механика. Отделение математики, механики и кибернетики АН СССР, 1969, 7.
3. Физика быстротекущих процессов. Сборник. М., «Мир», 1971.
4. Н. А. Златин, Г. И. Мишин. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. М., «Наука», 1974.
5. Г. Р. Фаулс, Г. Е. Дюваль и др. Приборы для научных исследований, 1970, 7.
6. М. Л. Уилкс.— В сб.: Вычислительные методы в гидродинамике. М., «Мир», 1967.
7. Р. В. Уайт, Р. Фаулс. Приборы для научных исследований, 1968, 9.

ХАРАКТЕР ДЕФОРМАЦИИ И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОНЫ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ СОУДАРЕНИИ ТОНКИХ ПЛАСТИН

М. П. Бондарь, В. А. Симонов

(Новосибирск)

При несимметричном соударении пластин в режимах сварки взрывом форма границы соединения определяется значениями основных параметров процесса: углом соударения γ , скоростью точки контакта v_k и соответственно величиной давления в окрестности точки контакта p [1, 2]. Кроме того, форма волнообразной границы соединения при одинаковых параметрах соударения может существенно изменяться в зависимости от отношения плотностей свариваемых металлов [3] и от их прочностных свойств [4]. В работе [5] на примере сварки пластин толщиной 0,5—1,0 мм показано, что процесс течения металлов в зоне соединения при $v_k < 0,5c_t$ (c_t — скорость поперечных волн) осуществляется в соответствии с закономерностями пластической деформации поликристаллических материалов. Это подтверждается установ-

ленной зависимостью значений v_k , при которых начинается волнообразование, от размера зерен d на поверхности пластин. При одних и тех же параметрах соударения граница соединения была волновой при $d \sim 100-300$ мкм и «гладкой» при $d > 1000$ мкм. Из этого следует, что границы зерен могут быть барьерами, ограничивающими скольжение. Ограничение скольжения размерами зерна приводит к образованию бугра впереди точки контакта, что является необходимым условием для развития процесса волнообразования.

Настоящая работа посвящена исследованию деформации пластин в зоне соединения при $v_k > 0,5c_\tau$ и $p \sim 0,1G$, где модуль сдвига $G = 7700$ кг/мм² и $c_\tau = 3000$ м/с соответствуют средним значениям этих величин для упрочненных медных сплавов [6]. Использование таких значений v_k и p приводит к увеличению скорости деформаций в зоне соединения. При этом в большей степени должна проявиться скоростная зависимость прочностных характеристик материала, если он не ведет себя подобно жидкости. Исходя из этих предпосылок, в экспериментах использовались медные сплавы, полученные методом внутреннего окисления, весьма отличающиеся значениями предела текучести σ_s и работы упрочнения

$$w_p = \int_{\sigma_s}^{\sigma_b} \varepsilon \cdot d\sigma.$$

Состав (% об.) и прочностные характеристики сплавов приведены ниже:

	Состав	σ_s , кг/мм ²	σ_b , кг/мм ²	ε , %	Удельн. w_p , кг/мм ²
Сплав 1	1,88% Al ₂ O ₃	28	32	4—6	14—16
Сплав 2	1,40% SiO ₂	9	28	16	304

Различие механических свойств сплавов связано с природой, размером, формой упрочняющих частиц и энергией их связи с матрицей. В сплаве 1 частицы Al₂O₃ имеют плоскую огранку, их средний размер на поверхности равен 250 Å и растет по мере удаления от поверхности. В сплаве 2 частицы SiO₂ имеют сферическую форму, средний размер на поверхности 800 Å, энергия связи на границе раздела с матрицей значительно ниже, чем у сплава 1. Пластины имели размеры 120×40×1 мм³. В экспериментах осуществлялись следующие параметры соударения:

v_0 , м/с	p , кг/мм ²	γ , град	v_k , м/с
470	770	15	1820

где v_0 — скорость метаемой пластины; $p = 1/2 \rho c_0 v_0$; ρ — плотность меди; c_0 — скорость звука.

Соударение пластин при указанных параметрах проводилось в сочетании сплавов 1+1; 2+2; 1+2; 2+1 (первый индекс относится к метаемой пластине, второй — к неподвижной). Давление соударения считалось одинаковым независимо от материалов пластин, поскольку в обоих сплавах объемная доля окислов незначительна, и поэтому их плотности считались равными плотности меди. Из сваренных образцов по среднему продольному сечению вырезались шлифы, по которым исследовалась граница соединения с помощью оптического микроскопа и электронного при использовании метода экстракционных реплик. Травление шлифов проводилось как для выявления линий деформации, так и для выявления упрочняющей фазы. Соединения сплавов 1+2 и 2+1 позволяли легко обнаружить границу соединения в электронном микроскопе по различной форме частиц упрочняющей фазы. Во всех экспериментах форма границы соединения была волновой.

Исследования структуры показали, что в соединениях 1+1 объем расплавленных зон значительно больше, чем в соединениях 2+2. В соединениях 1+2 и 2+1 также наблюдаются небольшие зоны расплавов, причем в соединениях 1+2 они меньше, чем в 2+1.

Кроме того, обнаружено, что форма границы соединения изменяется в зависимости от того, какая из пластин была неподвижной. Если неподвижна пластина из сплава 2, то линия соединения представляет собой волны достаточно правильной синусоидальной формы с равной шириной основания бугра деформации в обеих пластинах (рис. 1, а). В этом случае ширина бугра по его основанию равна длине волны λ . Если неподвижна пластина из сплава 1, то симметрия волн нарушается. Ширина бугра в нижней пластине становится меньше λ , в верхней, наоборот, больше λ (рис. 1, б).

Электронно-микроскопические исследования зоны соединения 1+2 показали, что частицы упрочняющей фазы со стороны сплава 1 располагаются параллельно линии шва, наблюдается их сильное уплотнение, линий деформации не видно из-за плотного расположения окисных частиц (рис. 2). Ширина области с параллельным расположением частиц меняется вдоль линии соединения и не превышает 10 мкм. Со стороны сплава 2 видны следы скольжения, направления их меняются при переходе от блока к блоку, уплотнения частиц у шва не наблюдается.

Описанные изменения формы волн указывают на различный характер деформации пластин, участвующих в несимметричных соударениях. Для дополнительного подтверждения этого предположения были проведены эксперименты, в которых на пластины сплава 1 напылялся слой алюминия толщиной ~ 15 мкм. Для укрепления напыленного слоя пластинки отжигались в вакууме (10^{-3} мм рт. ст.) в течение 10 ч. При метании сплава 1 на сплав 2 слой алюминия равномерно распределяется по всему шву (рис. 1, в). При перемене пластин местами у вершин бугров в сплаве 1 алюминий не обнаруживается (рис. 1, г) (рыхлый слой вдоль границы соединения на рис. 1, в, г является следом напыленного алюминия).

Из фотографий, представленных на рис. 1, видно, что форма границы соединения определяется деформацией неподвижной пластины. В связи с этим процесс образования границы соединения может быть представлен следующим образом. При соударении пластин в окрестности точки контакта возникает зона высоких напряжений. Наличие свободной поверхности впереди точки контакта определяет развитие сдвиговой деформации и, следовательно, релаксацию напряжений. Расстояние, на котором будут развиваться эти процессы, определяется свойствами материала. Малое значение σ_s определяет плавный спад напряжений в окрестности точки контакта. Увеличением значения σ_s в указанных условиях деформирования можно пренебречь из-за больших значений p . Большая величина σ_s для сплава 1 определяет более резкий спад напряжений. Характер релаксации напряжений в окрестности точки контакта определяет развитие бугра большей протяженности для соединения 1+2 и резко ограниченного по ширине бугра для случая 2+1. Образовавшийся бугор деформации на неподвижной пластине изменит геометрию подхода метаемой пластины к нижней и, следовательно, нормальную и тангенциальную составляющие напряжений в зоне соударения, которые оказывают влияние на форму бугра. Развитие деформаций на поверхности соударения метаемой пластины, как видно из исследований для данных толщин свариваемых пластин, определяется деформацией неподвижной пластины.

Опыты по сварке пластин с напыленным слоем алюминия показывают, что поверхность соударения метаемой пластины деформируется равномерней. Влияние метаемой пластины на форму бугра, образовавшегося на неподвижной пластине после точки В (рис. 3), мало из-за

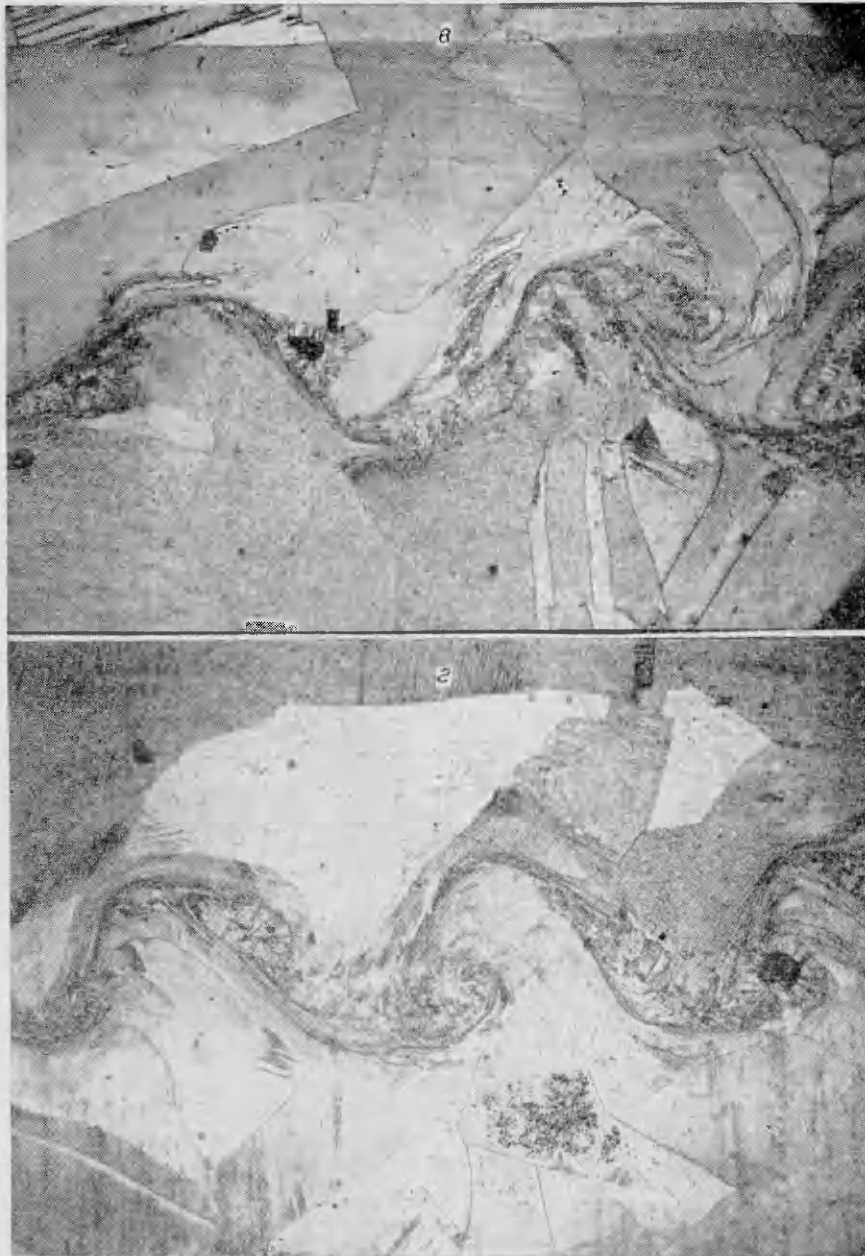


Рис. 1.

большого угла подхода. Исходя из известных экспериментов [7], показывающих, что каждый элемент метаемой пластины движется по инерции независимо от соседних (точка B переходит в C , рис. 3), можно определить совместную деформацию пластин в зоне соединения, как

$$\varepsilon = (L_{ABD} - L_{AD}) / L_{AD}.$$

Длины участков зоны соединения L_{ABD} и L_{AD} определяются непосредственно по шлифам. Поскольку время образования элемента L_{ABD} есть $t = L_{AD} / v_{\text{к}}$, можно определить и значение скорости деформации $\dot{\varepsilon}$. Тогда



для соединений 1+2 и 2+1 получим соответственно $\epsilon=0,3$; $\epsilon=1 \cdot 10^6 1/c$ и $\epsilon=0,8$; $\epsilon=3 \cdot 10^6 1/c$.

По значениям этих величин можно сделать приближенную оценку скорости движения дислокаций по известному выражению

$$\epsilon = Nb\bar{v},$$

где N — плотность подвижных дислокаций; b — вектор Бюргера, равный $3 \cdot 10^{-8}$ см для меди; \bar{v} — скорость дислокаций. Если взять заведо-

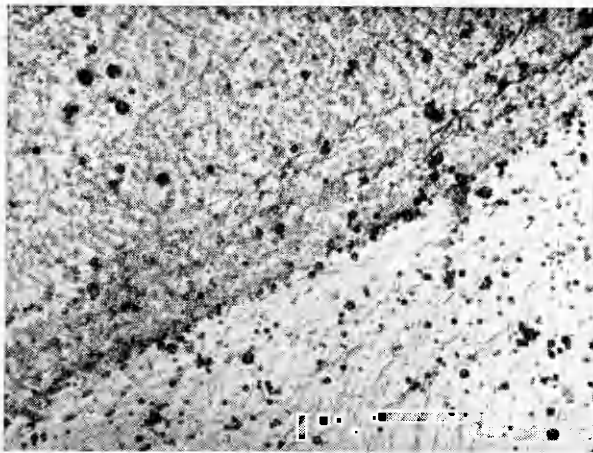


Рис. 2.

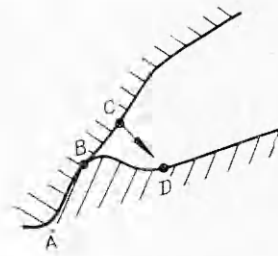


Рис. 3.

мо завышенное число $N=10^9 \text{ см}^{-2}$ для сплава 1, то получим \bar{v} , по порядку величины равную ее предельному значению c_{τ} . Такое значение \bar{v} возможно, если

напряжения при соударении равны теоретическому напряжению сдвига τ_{τ} . Достижимое при соударении значение $p \sim 0,1G$, вероятно, может обеспечить такой уровень напряжений. Правильность оценки \bar{v} и напряжений по значениям p подтверждается картиной структурных характеристик, полученных с помощью электронного микроскопа (см. рис. 2). Наличие области интенсивного течения вдоль линии соединения со стороны сплава 1, отсутствие связи течения с определенным кристаллографическим направлением, приводящим к концентрации частиц окислов вдоль линии соединения, указывают на то, что уровень напряжений в этой области равен τ_{τ} . Только при таком напряжении движущиеся дислокации могут преодолеть барьеры высотой 250 \AA в виде плоскогранных частиц Al_2O_3 за время, равное времени сварки. При напряжениях ниже τ_{τ} движение дислокаций в сплаве 1 затруднено, что и определило ограниченность области интенсивного течения.

Интенсивная деформация сплава 2. не ограничивается узкой областью. Большие расстояния между частицами и их сферическая форма не препятствуют развитию сдвигов при напряжениях, меньших τ_{τ} . Распространение деформации на большое расстояние от линии соединения приводит к тому, что большая часть энергии соударения затрачивается на работу деформации, а не выделяется в виде тепла, как это наблюдается при ограничении деформации узкой зоной в случае соединения 1+1.

Подводя итоги проведенного исследования следует отметить, что:

- 1) при несимметричном соударении пластин толщиной 1,0 мм в режимах сварки взрывом форма волнообразной зоны соединения определяется характером деформации неподвижной пластины, который в свою очередь зависит от механических свойств используемого материала;
- 2) при сварке пластин из материалов с высоким σ_s и малым удельным значением w_p область интенсивного течения ограничена, в результате большая часть энергии соударения выделяется в виде тепла в узкой зоне;
- 3) полученные закономерности необходимо учитывать при сварке тонких пластин, часто используемых при создании композитных материалов.

Поступила в редакцию
23/III 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас, В. М. Кудинов, Ф. И. Матвеевков. ФГВ, 1967, 3, 4.
2. А. А. Дерибас, В. В. Пай, В. А. Симонов. III Международный симпозиум «Обработка металлов взрывом». Т. 1, Марианские Лазни, 1976.
3. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
4. А. А. Дерибас, В. М. Кудинов и др. ФГВ, 1968 4, 1.
5. М. П. Бондарь, А. А. Дерибас и др. ФГВ, 1976, 12, 5.
6. Таблицы физических величин. Справочник. М., Атомиздат 1976, с. 44.
7. U. Richter. III Internationale Symposium "Sprengbearbeitung von Metallen". В. II, Marianske Lasne, 1976.

О НЕОБХОДИМЫХ УСЛОВИЯХ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

И. Д. Захаренко

(Новосибирск)

В литературе описано большое количество исследований, посвященных анализу условий, необходимых для сварки взрывом. В настоящей работе проведены эксперименты, показывающие существенное влияние предварительной очистки поверхности материала на положение нижней границы области сварки. Эксперименты проводились на стальных образцах размером $70 \times 140 \times 7$ мм, одна поверхность которых шлифовалась наждачной бумагой с последовательно уменьшающейся величиной зерна до нулевого размера. Образцы с помощью аргоно-дуговой сварки герметично сваривались в контейнеры, внутрь которых по периметру помещались полоски титановой фольги (рис. 1). Несколько контейнеров помещались в стальную емкость, которая также герметично заваривалась и помещалась в печь, где нагревалась до температуры 1100°C . При этой температуре емкость выдерживалась 5 ч, затем охлаждалась вместе с печью. Газы, содержащиеся в контейнере, поглощались титаном, а окисные пленки диффундировали в основной металл [1]. После термообработки часть контейнеров разгерметизировалась, месяц выдерживалась на воздухе при комнатной температуре. Перед сваркой взрывом эти образцы вновь герметизировались и вакуумировались до давления 10^{-1} мм рт. ст.

Для определения предельных режимов, при которых еще возможна сварка данных образцов, на одну из поверхностей контейнера помещался заряд взрывчатого вещества, при детонации которого происходила сварка образцов по шлифованным поверхностям. Режимы соударения рассчитывались по формулам работы [2]. Правильность проведенных расчетов для некоторых режимов проверялась с помощью методики [3], которая позволяет измерить угол соударения между пластинами. Эти измерения показали хорошее совпадение расчетных и экспериментально измеренных значений угла соударения.

Таким образом, проведены две серии экспериментов с одинаково обработанными

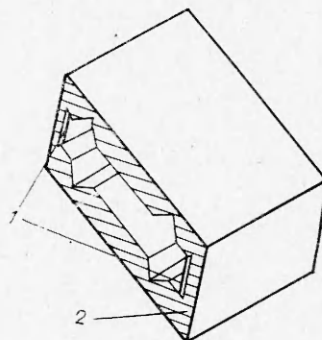


Рис. 1. Свариваемые образцы.

1 — титановая фольга; 2 — контейнер.