

## СВАРКА ВЗРЫВОМ СТАЛИ С АЛЮМИНИЕМ

Б. С. Злобин

Научно-производственное предприятие «МАТЕМ», 630090 Новосибирск, root@matem.nsk.su

Анализируются основные кинематические параметры, определяющие начало образования соединения вблизи нижней границы области сварки взрывом. Рассмотрены особенности сварки алюминия со сталью. Приведены экспериментальные результаты исследования течения материала в зазоре при косом соударении металлических пластин.

Ключевые слова: косое соударение, поток частиц, сварка взрывом.

Сварку взрывом относят к процессам соединения материалов в твердой фазе. По мере увеличения различия в свойствах металлов количество способов, которыми их можно соединить, уменьшается. Используя сварку взрывом, можно получить наибольшее количество сочетаний металлов. Это позволяет говорить о том, что, помимо общих закономерностей соединения металлов в твердой фазе, высокого давления и значительных пластических деформаций, сварка взрывом должна иметь характерную особенность.

Сварка взрывом происходит при косом соударении пластин. Для описания процесса используют кинематические параметры, впервые предложенные в работах [1, 2]:  $V_0$  — скорость соударения,  $V_k$  — скорость точки контакта,  $\gamma$  — угол соударения. Для малых углов соударения связь между этими параметрами можно выразить из геометрических соображений:

$$V_0 = V_k \sin \gamma.$$

Рассмотрим основные условия, необходимые для реализации процесса сварки при указанных параметрах. Во-первых, для соединения металлов требуется, как минимум, чтобы в каждой точке соударения параметры  $V_0$ ,  $V_k$  и  $\gamma$  были величинами постоянными по всей длине пластин, а угол соударения  $\gamma$  равнялся бы углу поворота  $\beta$  при начальном (параллельном) расположении пластин. Этого можно добиться только в том случае, если при соударении металлическая пластина по всему сечению, проходящему через точку соударения, перейдет в пластическое состояние, т. е. упругие характеристики материала будут превышены. В работе [3] показано, что это условие можно представить в виде

$$\frac{V_k^2 \sin^2 \gamma}{\gamma} = \frac{2\tau_s}{\rho}. \quad (1)$$

Здесь  $\tau_s$  — предел текучести на сдвиг, а  $\rho$  — плотность материала. Пользуясь выражением (1), можно определить критическую скорость  $V_0$ , обеспечивающую стационарность параметров  $\gamma$  и  $V_k$  по всей длине соударяющихся пластин. Выражение (1) является необходимым условием при сварке взрывом и определяет так называемую «супернижнюю» границу. На  $\gamma - V_k$ -диаграмме (рис. 1) только в области выше «супернижней» границы (кривая 1) можно говорить о  $V_k$  и  $\gamma$  как о величинах определенных, имеющих постоянное значение по всей длине соединяемых поверхностей. И только в этом случае можно рассматривать другие условия, обеспечивающие образование соединения.

При выполнении условия (1) и дальнейшем увеличении скорости  $V_0$  процесс соударения переходит в режимы, при которых в зоне

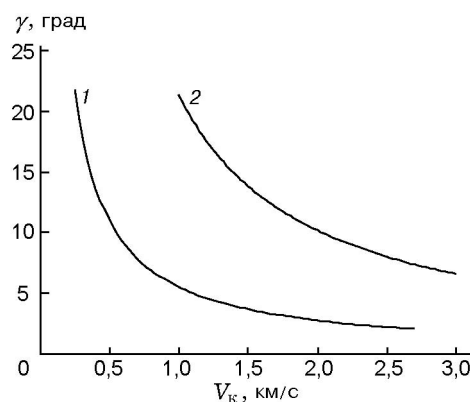


Рис. 1. Область начала образования соединения:

1 — «супернижняя» граница, 2 — нижняя граница

контакта возможно возникновение обратного потока частиц, начинает образовываться соединение и далее на границе возможно появление волн.

В работе [4] предложена концепция, согласно которой процесс сварки взрывом, реализуясь при определенных режимах соударения, «сопровождается более или менее выраженным волнообразованием на границе соединения». Поэтому отыскание необходимых параметров сварки взрывом сводится к определению условий, обеспечивающих волнообразование на границе соединения. Такой подход не кажется обоснованным и может только усложнить понимание процесса образования соединения при сварке взрывом по следующим причинам. С одной стороны, сам процесс волнообразования при косом соударении металлических пластин — явление достаточно сложное. Многочисленные исследования до сих пор не дают его однозначной трактовки [5]. С другой стороны, анализ существующей литературы и многолетний опыт работы по сварке взрывом позволяют говорить о том, что образование соединения и волнообразование — это два самостоятельных физических процесса, параметры реализации которых частично перекрываются. Чаще всего образование соединения начинается при меньших значениях  $V_k$ , чем волнообразование.

Для однородных металлов, по данным [6], с увеличением разницы между пределом прочности  $\sigma_b$  и пределом текучести  $\sigma_s$  интервал безволнового соединения будет расти.

Для разнородных металлов с увеличением разницы в прочностных характеристиках область существования безволновой границы соединения также увеличивается. Например, у таких сочетаний, как «высокопрочная сталь — алюминий» или «твердый сплав — алюминий», твердость металлов отличается в  $10 \div 30$  раз. Попытки получить при этом волны на границе могут привести только к снижению прочности и даже к разрушению соединения.

Можно предположить, что для «запуска» процесса образования соединения достаточно превысить прочностные характеристики менее прочного материала и заставить его деформироваться. От начальной стадии образования соединения на химическом уровне, когда при разрыве биметалла на свариваемых поверхностях видны отдельные очаги схватывания, до получения шва с прочностью, равной

прочности основного материала, на  $\gamma - V_k$ -диаграмме всегда существует некоторая область, ширина которой существенно зависит от способов подготовки поверхности [7]. В условиях эксперимента при специальной подготовке свариваемых поверхностей прочное соединение можно получить, лишь выполнив условие (1). Это показано в работе [8]. На практике приходится иметь дело с материалами, поверхность которых покрыта оксидными пленками и другими адсорбированными соединениями, препятствующими непосредственному взаимодействию металлов. В этих условиях необходимо дополнительное воздействие, обеспечивающее непосредственный контакт соединяемых металлов. При соединении металлов в твердом состоянии в большинстве случаев это решается за счет деформации. При сварке взрывом характер деформации в зоне соударения определяется наличием кумулятивного эффекта.

Для материалов с сильно различающимися прочностными характеристиками картину в зоне соударения можно представить, подобно авторам работы [9], в виде, показанном на рис. 2. В специально поставленном эксперименте с «остановкой» процесса сварки нами были получены сталь-алюминиевые образцы, геометрия которых полностью совпадает с представленной на рис. 2. В работе [10] показано, что положение нижней границы области сварки взрывом на  $\gamma - V_k$ -диаграмме совпадает с началом образования обратного потока из менее прочного металла и может быть описано эмпирическим выражением [1]

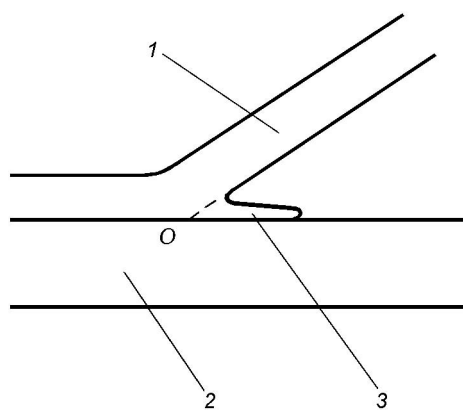


Рис. 2. Соударение алюминия со сталью:

1 — алюминиевая пластина, 2 — стальная пластина, 3 — обратный поток

$$\gamma = 1,14 \sqrt{\frac{H_V}{\rho V_k}} \quad (2)$$

при условии, что  $H_V$  и  $\rho$  — твердость и плотность менее прочного материала. Построенная по (2) нижняя граница показана на рис. 1 (кривая 2). Следует отметить, что изображение в виде линии границы перехода от упругого соударения к неупругому и от соударения в режиме, когда обратный поток образуется, к режиму, когда его нет, достаточно условно, поскольку не учитывает точность определения параметров  $\gamma$ ,  $V_k$  и состояние соединяемых поверхностей.

Наши эксперименты по сварке алюминия со сталью с использованием мишеней показали, что основная масса составляющих обратный поток частиц движется вдоль поверхности более прочного материала в виде тонкой плоской струи. На мишенях на уровне стальной поверхности струей прорезаются пазы глубиной до 3 мм. Часть частиц движется вне основного потока и заполняет все пространство между свариваемыми пластинами. Анализ осажденных на медной мишени частиц при сварке взрывом с вакуумированием, сделанный с помощью электронного микроскопа в ИГиЛ СО РАН, показал, что это частицы алюминия со средним размером 0,5 мкм (рис. 3). Прямые замеры, проведенные нами с помощью электроконтактного способа [10], показали, что скорость частиц в потоке составляла  $3,25 \div 3,75$  км/с, что на 30 ÷ 50 % выше значения  $V_k$ . Согласно оценке по гидродинамической модели толщина струи в экспериментах по металлу 4-миллиметровой алюминиевой пластины могла достигать до 30 мкм.

Обратный поток частиц, формируясь из поверхностных слоев алюминиевой пластины, подготавливает ее к взаимодействию. Двигаясь с высокой скоростью вдоль поверхности стальной пластины впереди точки контакта, поток частиц, имеющий вид струи толщиной большей, чем высота микронеровностей на стали ( $3,2 \div 6$  мкм), может сильно деформировать микронеровности и разрушать инертный поверхностный слой. Несмотря на небольшую толщину, в потоке может быть сконцентрировано до 50 % кинетической энергии метаемой пластины за счет высокой скорости частиц. Высокий уровень деформаций в алюминиевой пластине обуславливает высокую температуру алюминиевых частиц. В результате при взаимодействии со сталью происходит нагрев по-

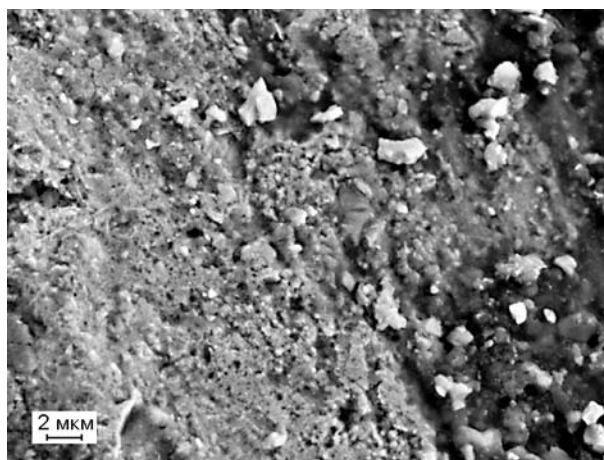


Рис. 3. Частицы алюминия из обратного потока на медной мишени

верхности последней, что способствует снижению прочностных характеристик. После такого воздействия поверхность стали также оказывается подготовленной к последующему взаимодействию. Попадая за точкой соударения в зону высокого давления, обе поверхности уже в той или иной степени подготовлены к образованию соединения. В этом случае можно говорить об увеличении «эффективного» времени взаимодействия соединяемых поверхностей.

Если рассматривать процесс с этих позиций и сравнивать возможную толщину струи с высотой микронеровностей, становится более понятным влияние шероховатости поверхности на прочность шва при сварке вблизи нижней границы [11, 12].

В отличие от мнения о том, что «энерготраты, приходящиеся на кумуляцию, бесполезно теряются в балансе системы соударяющихся пластин» [13], можно утверждать, что обратный поток материала вносит существенный вклад в процесс образования соединения. Исходя из этого можно объяснить необходимость при сварке достаточно тонких пластин увеличивать скорость  $V_0$  по сравнению с расчетной [14]. Увеличение  $V_0$  приводит к росту времени протекания деформационных процессов не только за точкой контакта, как указано в работе [15], но и перед ней.

Если считать, что при сварке взрывом в качестве основного инструмента выступает обратный поток (в данном случае состоящий в основном из алюминия), то и размеры зон, охваченных значительными пластическими деформациями в каждом из материалов, будут находиться в обратной зависимости от прочност-

ных характеристик. Это подтверждается и экспериментальными данными [16].

В более прочном материале размеры зоны пластических течений, обеспечивающих образование соединения, будут значительно меньше, чем в случае образования на границе волн. Деформации в более прочном металле, необходимые для образования соединения, в первом приближении можно сравнить с деформациями в подложке при газотермическом напылении порошковых материалов (согласно оценкам в работе [17]  $\varepsilon_{\min} \approx 0,025\%$ ). В связи с этим предположение, высказанное в работе [4], о том, что при сварке взрывом пластические течения на границе соединения реализуются при условии, когда динамические пределы текучести становятся близкими, для материалов с различающимися прочностными характеристиками подтверждения не находят.

### ВЫВОДЫ

При косом соударении пластин в режимах сварки взрывом характер деформации в поверхностных слоях соединяемых материалов определяется наличием кумулятивного эффекта (струеобразования).

При сварке стали и алюминия в зазоре образуется обратный поток (в основном из алюминиевых частиц), который способствует деформации поверхностных слоев более твердого материала, создавая тем самым необходимые условия для образования соединения. При этом на границе соединения волны, как правило, отсутствуют.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Дерибас А. А.** Классификация течений, возникающих при косых соударениях металлических пластин // Explosive Working of Metals (2-й Международный симпозиум по использованию энергии взрыва). Marianske Lasne, Oct. 1973. С. 31–43.
2. **Wittman R. H.** The influence of collision parameters on the strength and microstructure of the explosion welded aluminum alloy // Ibid. С. 153–168.
3. **Deribas A. A., Gulidov A. I., Zlobin B. S. et al.** On the oblique collisions of the metallic plates at extreme conditions // Proc. XIII AIRAPT Intern. Conf. on High Pressure Science and Technology, 1991, Bangalore. Oxford & IBN Publishing Co. PVT. Ltd., 1992. P. 712–718.
4. **Петушков В. Г.** О физической трактовке процесса сварки взрывом вблизи ее нижней границы // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 6. С. 104–110.
5. **Волнообразование** при косых соударениях: Сборник науч. тр. / Под ред. И. В. Яковлева и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
6. **Бондарь М. П.** Научные основы получения материалов динамическими методами: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 1996.
7. **Добрушин Л. Д.** К вопросу о нижней границе сварки взрывом // Автоматическая сварка. 1979. № 6. С. 64–65.
8. **Захаренко И. Д.** Сварка металлов взрывом. Минск: Наука и техника, 1990.
9. **Botros K. K., Groves T. K.** Fundamental impact-welding parameter — an experimental investigation using 76-mm powder cannon // J. Appl. Phys. 1980. V. 51, N 7. P. 3706–3714.
10. **Злобин Б. С., Киселев В. В., Гулидов А. И.** Исследование течения материала в зазоре между соударяющимися пластинами // Обработка материалов импульсными нагрузками. Новосибирск: ИТПМ, 1990. С. 216–224.
11. **Сидоров И. И., Тынтарев А. М., Кирилин Э. Ф.** Биметалл титан — сталь, полученный сваркой взрывом, и его применение // Вопросы материаловедения. 1999. № 3 (20). С. 276–292.
12. **Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д.** Сварка взрывом. М.: Машиностроение, 1987.
13. **Лысак В. И., Берсенев П. В., Кузьмин С. В. и др.** Методика оценки кумулятивных потерь при сварке металлов взрывом // Сварка взрывом и свойства сварных соединений. Волгоград: Волгоград. политехн. ин-т, 1988. С. 25–40.
14. **Соннов А. П.** Влияние исходных физико-механических свойств свариваемых материалов на параметры режимов сварки взрывом // Там же. С. 3–17.
15. **Лысак В. И., Кузьмин С. В., Досгий Ю. Г. и др.** Анализ кинетики формирования слоистых композиционных материалов при сварке взрывом // Физика и химия обработки материалов. 2000. № 6. С. 57–63.
16. **Злобин Б. С.** Влияние прочностных характеристик материалов на режимы сварки взрывом // Использование энергии взрыва для производства металлических материалов с новыми свойствами: Материалы VI Междунар. симпоз., Готвальдов, окт. 1985. Готвальдов, 1985. С. 271–278.
17. **Черноиванов В. И., Каракозов Э. С.** Физико-химические процессы образования соединения при напылении порошковых материалов. Постановка задачи // Сварочное производство. 1984. № 1. С. 2–5.

Поступила в редакцию 28/IV 2001 г.,  
в окончательном варианте — 13/VII 2001 г.