

УДК 621.791.76: 621.7.044.2

*С. В. Кузьмин, д-р техн. наук, В. И. Лысак, д-р техн. наук,
В. В. Рыбин*, чл.-корр. РАН, А. П. Пеев, к-т техн. наук*

ОСОБЕННОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЫ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

*Волгоградский государственный технический университет, weld@vstu.ru
СЗО Академии инженерных наук им А. М. Прохорова, Санкт-Петербург

В работе представлены результаты исследования пластического деформирования металла околошовной зоны при сварке взрывом модельных разнородных (меди с алюминием) пластин. Установлено, что существенное влияние на деформированное состояние металла околошовной зоны сваренных взрывом модельных пластин оказывает скорость соударения, а значительная локализация деформации в более прочном металле приводит к сосредоточению тепловой энергии, выделившейся в результате пластической деформации, что можно считать одной из причин образования участков структурной и химической неоднородностей на границе соединения.

Ключевые слова: сварка взрывом, пластическая деформация

S. V. Kuz'min, V. I. Lysak, V. V. Ribin, A. P. Peev*

FEATURES OF PLASTIC DEFORMATION OF STEEL IN THE HEAT-AFFECTED ZONE DURING EXPLOSION WELDING OF DISSIMILAR METALS

*Volgograd State Technical University, weld@vstu.ru
NWB Prokhorov Academy of engineering sciences, Saint Petersburg

The results of the investigation of plastic deformation of steel in the heat-affected zone during explosion welding of dissimilar (copper and aluminum) pattern plates are presented in the paper. It was determined that impact velocity had considerable influence on the strained state of steel in the heat-affected zone of the explosion-welded pattern plates, and significant localization of steel deformation in a stronger metal leads to concentration of heat energy, released as a result of plastic deformation, which can be considered one of the reasons of the formation of areas of structural and chemical inhomogeneity on the borderline of the welded joint.

Keywords: explosion welding, plastic deformation

Формирование соединения при сварке взрывом происходит по твердофазному механизму за счет совместной упругопластической деформации приконтактных объемов свариваемых материалов [1 ... 3]. Быстротечность сварки взрывом затрудняет изучение процесса деформирования металла околошовной зоны (ОШЗ) во время образования соединения, поэтому анализ основных закономерностей деформирования металла проводится по картинам остаточной деформации по окончании процесса [4 ... 12]. Эпюры остаточных сдвиговых деформаций g_{\max} в металле ОШЗ получают при помощи различных экспериментальных методов механики твердого деформируемого тела с использованием слоистых моделей [4 ... 7 и др.], координатных сеток или меток-реперов [1,8 ... 11], а также структурно-наследственных

методов [12].

подавляющее большинство результатов исследований основных закономерностей деформирования металла ОШЗ при сварке взрывом получено для однородных пар металлов (Al+Al, Cu+Cu, сталь+сталь, и др.). При этом, исходя из предположения об идентичности картин остаточных деформаций модельных материалов, а, следовательно, и эпюр максимальных сдвигов в одноименных свариваемых элементах, авторы большинства работ упростили схему эксперимента и ограничились исследованием деформирования металла ОШЗ лишь в неподвижном модельном образце.

Процессы деформирования в ОШЗ, протекающие при сварке взрывом разнородных металлов с резко отличающимися физико-механическими свойствами, представляют значи-

тельный научный и практический интерес, в литературе освещены достаточно слабо, а имеющиеся результаты носят отрывочный характер и обычно касаются исследования деформирования металла ОШЗ лишь в неподвижном модельном образце [1, 2, 5 ... 8 и др.].

Целью настоящей работы явилось изучение основных закономерностей деформирования металла околошовной зоны при сварке взрывом разнородных металлов.

Для изучения закономерностей пластического деформирования приграничных объемов металла свариваемых взрывом образцов использовали методику, основанную на применении слоистых модельных вставок [7] в метаемой и неподвижной пластинах из рулонированной фольги толщиной 25 ... 30 мкм и последующей компьютерной обработке получаемых деформационных картин в ОШЗ сварных соединений.

В качестве модельных материалов были выбраны медь и алюминий как обладающие большими различиями по физико-механическим свойствам и, кроме того, имею-

щие важное практическое значение, а опыты проводили по однофакторной схеме, в каждой серии которых скорость точки контакта V_k оставляли неизменной (1600, 2000 и 2600 м/с), а изменяли скорость соударения V_c (200 ... 350 м/с) и соответственно угол соударения γ (4 ... 15°). При этом каждую серию экспериментов проводили в двух вариантах: по прямой схеме, когда метаемым элементом служила медная пластина, и по обратной – медная пластина оставалась неподвижной. Параметры процесса, в том числе единичная масса свариваемых пластин, оставались строго одинаковыми независимо от схемы сварки, что достигалось соответствующим расчетом высоты заряда ВВ и установочного зазора.

В результате обработки экспериментальных данных установлено, что при сварке взрывом модельных медных и алюминиевых образцов степень локализации пластических сдвиговых деформаций в ОШЗ более прочной медной пластины существенно выше, чем в алюминиевой. Количественно это проявляется в различной

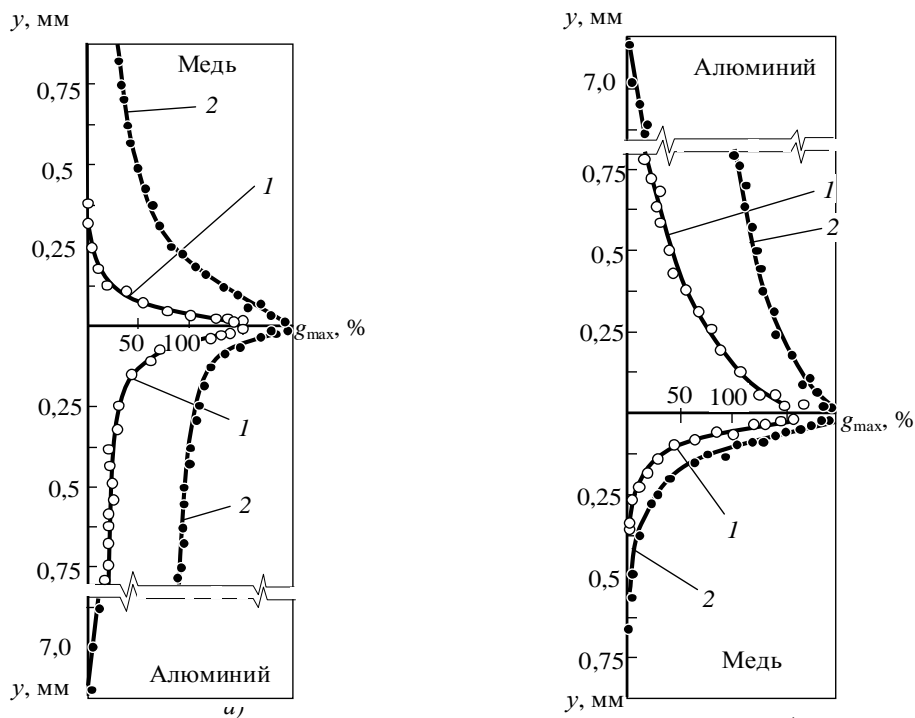


Рис. 1. Эпюры максимальных сдвигов в ОШЗ сваренных взрывом по прямой (а) и обратной (б) схемам медно-алюминиевых композиций ($V_k = 1600$ м/с): 1 – $V_c = 200$ м/с; 2 – $V_c = 350$ м/с

толщине деформированных слоев различных металлов. Так, если в меди толщина деформированного слоя (при сварке по прямой схеме) составляет 0,25 ... 0,3 мм и 1,0 ... 1,25 мм при $V_c = 200$ м/с и $V_c = 350$ м/с соответственно (рис. 1, а), то при тех же параметрах соударения для алюминия нулевые значения g_{\max} фиксируются на удалении 1,0 ... 1,2 мм и 7 мм соответственно. Смена схемы сварки на обратную приводит к еще большей локализации деформации в медной пластине (рис. 1, б).

Вполне очевидно, что как и в случае сварки однородных (алюминиевых) пластин [13, 14] на уровень остаточной сдвиговой деформации и глубину деформирования влияют параметры процесса сварки, которые, в конечном счете, и определяют качество сварного соединения.

Влияние скорости точки контакта. При режимах сварки, обеспечивающих относительно высокую для пары медь – алюминий

$V_k = 2600$ м/с при минимально возможных энергозатратах ($W_2 = 0,15 \dots 0,2$ МДж/м²) (прямая схема) линия соединения имеет профиль, близкий к волнообразному, и характеризуется наличием участков оплавленного металла у основания бугров деформации (рис. 2, а). При уменьшении V_k формируется соединение с прямолинейным профилем границы раздела слоев с характерным однородным распределением в направлении вектора скорости точки контакта сдвиговой деформации (рис. 2, б) и ее высокой степенью локализованности в меди.

Влияние скорости соударения. Скорость соударения оказывает (как и при сварке однородных материалов) значительное влияние на характер пластического деформирования металла ОШЗ в медно-алюминиевых модельных образцах (см. рис. 1). Так увеличение V_c (прямая схема) наряду с существенным расширением толщины деформированного металла при-

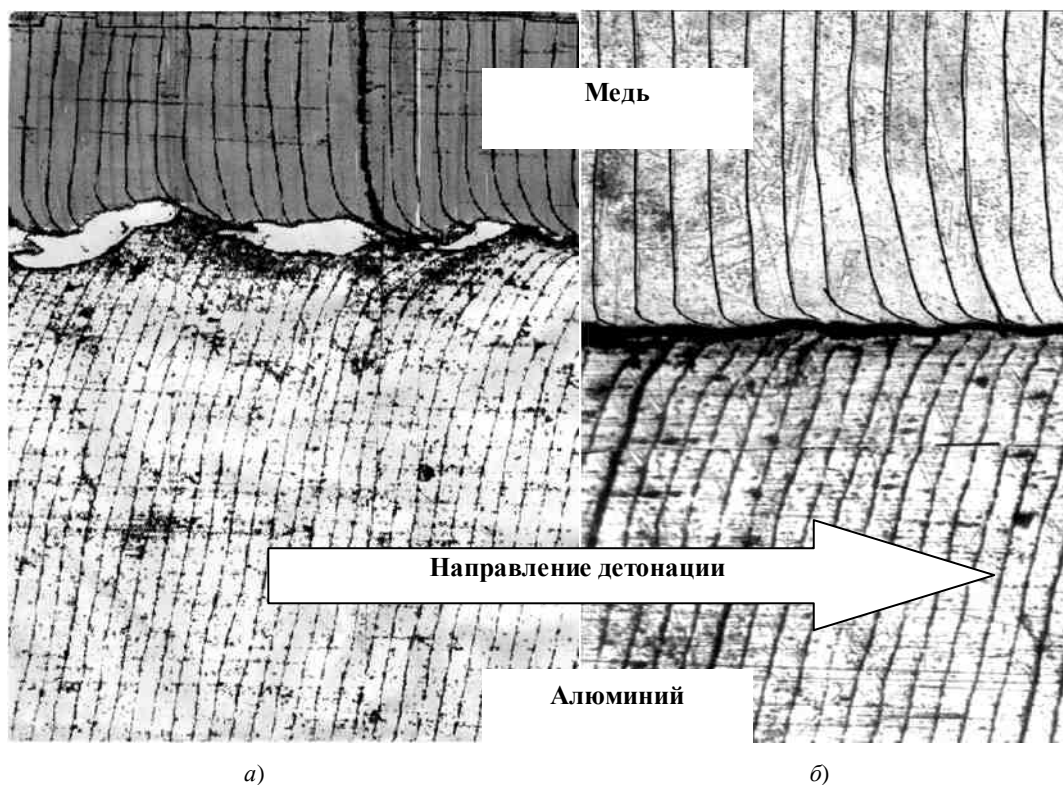


Рис. 2. Влияние скорости точки контакта на деформационную картину в модельных поперечно-слоистых образцах при сварке меди с алюминием ($V_c = 200$ м/с): а – $V_k = 2600$ м/с; б – $V_k = 2000$ м/с

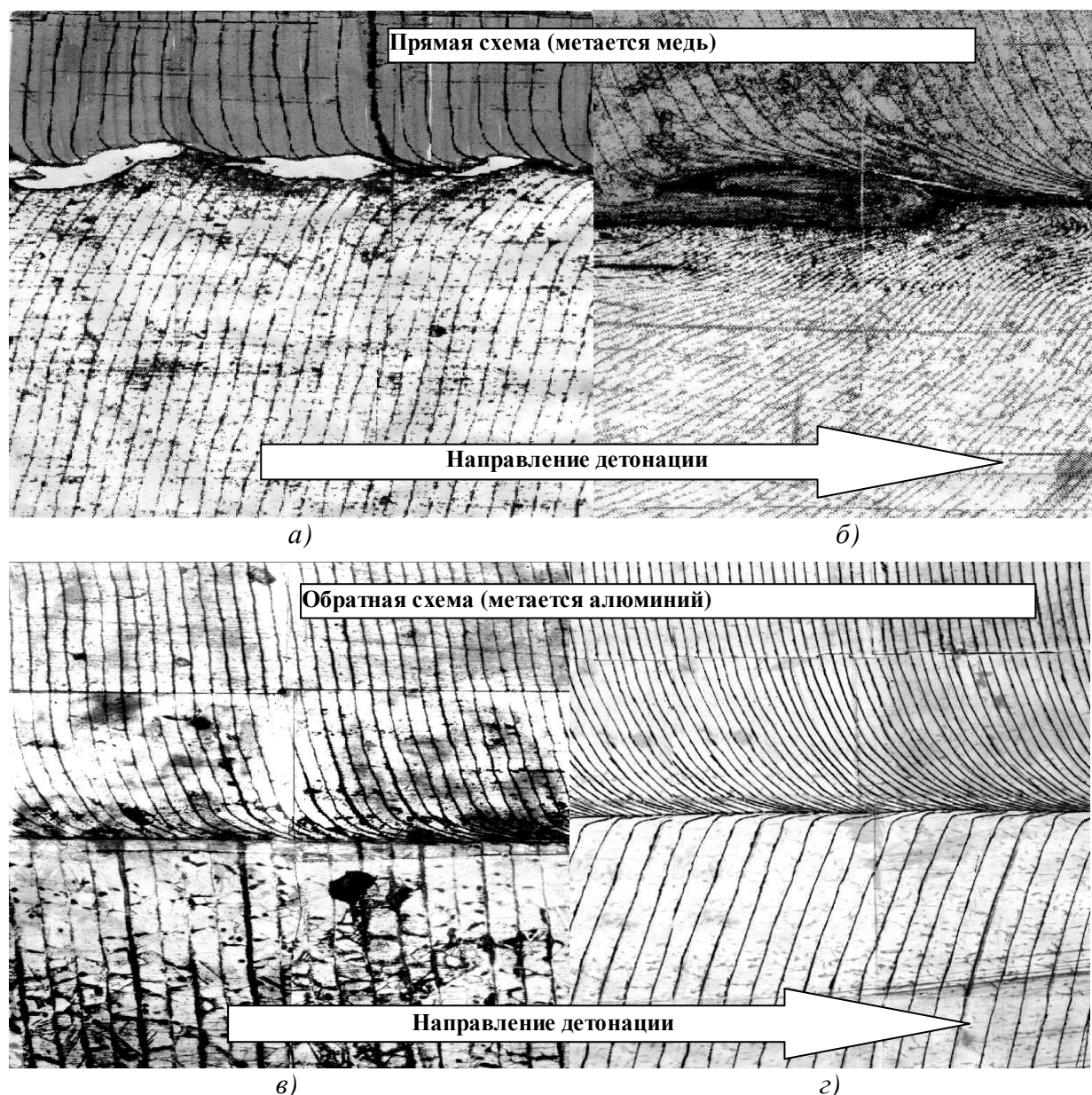


Рис. 3. Структура зоны соединения меди с алюминием (разрез по модельным поперечным вставкам образцов, сваренных при $V=2600$ м/с): а, в – $V_c = 200$ м/с; б, г – $V_c = 350$ м/с

водит к формированию волнового профиля соединения, параметры которого нестабильны (рис. 3, а, б). При этом вершины бугров деформации в алюминии направлены противоположно вектору распространения процесса сварки, что, очевидно, связано с особенностями формирования бугров деформации как перед, так и за точкой контакта. В меди в основаниях волн образуются завихрения, внутри которых сосредоточены частицы алюминия, рыхлоты и др. включения. Следует также отметить различный

характер пластического течения разных слоев медных модельных вставок. На фотографии микрошлифов (см. рис. 3, б) отчетливо видно, что подавляющая часть слоев испытывает деформацию растяжения, о чем свидетельствует уменьшение их толщины, однако в зонах завихрения имеются слои, подвергшиеся сжатию. Напомним, что в аналогичных условиях нагружения двух алюминиевых пластин зона соединения была прямолинейной [13, 14], а слои вставки испытывали однородную деформацию

в направлении процесса сварки. Увеличение скорости соударения в этом случае приводило к регулярному волнообразованию на границе соединения, чего не наблюдалось при сварке меди с алюминием.

Влияние схемы сварки взрывом. Анализ многочисленных экспериментальных результатов показал, что помимо рассмотренных выше параметров соударения на характер пластического течения металла ОШЗ существенное влияние оказывает схема сварки. Так при метании медной пластины (прямая схема) при $V_c = 200$ м/с и $V_k = 2600$ м/с на границе соединения образуются участки оплавленного металла, а сама граница имеет близкий к волновому профиль (см. рис. 3, а). При таких же и более жестких режимах нагружения по обратной схеме (метается алюминий) граница соединения прямолинейна, оплавов и других дефектов в ней не наблюдается (см. рис. 3, в, з).

Следует также отметить, что при обратной схеме плакирования толщина деформированной зоны в меди менее чувствительна к изменению скорости соударения (см. рис. 1, б). Безусловно, перечисленные особенности необходимо учитывать при проектировании технологических процессов сварки взрывом.

Анализ полученных результатов позволил выявить основную особенность пластического деформирования металла околошовной зоны при сварке взрывом меди с алюминием, заключающуюся в существенно различающейся степени локализации максимальных сдвигов в ОШЗ соединения. При этом Количественно это проявляется в различной толщине деформированных слоев различных металлов. Отмечается также, что при одинаковых режимах сварки большая степень локализации деформации в меди наблюдается при обратной схеме плакирования, когда метаемой является алюминиевая пластина.

Небезынтересным представляется вопрос о распределении энергии, затрачиваемой на пла-

стическую деформацию металла ОШЗ соединения, между слоями композиций для случаев сварки взрывом разнородных материалов, в качестве которых рассмотрим пару алюминий+медь, для которой ранее построены эпюры сдвиговых деформаций (рис. 1). С этой целью определим работу деформации расчетно-графическим методом с помощью имеющихся эпюр $g_{\max} = f(y)$. Зная характер распределения $g_{\max} = f(y)$ в конкретном сварном соединении (рис. 4), будем считать, что площадь, ограниченная эпюрой, пропорциональна работе деформации или, что то же самое, энергии, затраченной на пластическое деформирование металла.

Элементарная работа деформации δA_d для элементарного объема dV согласно [15] может быть определена как

$$\delta A_d = S_k g_{\max} dV, \quad (1)$$

где g_{\max} – значение сдвиговой пластической деформации металла объемом dV ; S_k – сопротивление металла деформированию, численно равное динамическому пределу текучести σ_T^d [16] (для меди и алюминия σ_T^d соответственно равен 640 и 108 МПа).

Удельная, т.е. отнесенная к единице площади сварного образца элементарная работа деформации (Дж/м²) запишется как

$$\delta A_d = S_k g_{\max}(y) dy, \quad (2)$$

а полная удельная работа может быть получена интегрированием по y элементарных работ $\delta A_d(y)$:

$$A_d = S_k \int_0^{\delta} g_{\max}(y) dy, \quad (3)$$

где $g_{\max}(y)$ – текущее значение сдвиговой деформации на удалении y от линии соединения, численно равное g_{\max} ; δ – толщина пластины.

При вычислении интеграла воспользуемся методом прямоугольников, для чего интервал интегрирования от 0 (линия соединения) до δ

(толщина исследуемого образца) разобьем на n равных частей и для сечений с ординатами y_1, y_2, \dots, y_n вычислим значение интегрируемой функции $\epsilon(y)$. Тогда приближенное значение работы деформирования будет равно:

$$A_d = \sum_{i=0}^n \Delta A_{di} = S_k \Delta y \sum_{i=0}^n g_{\max i}, \quad (4)$$

где $\Delta y = \delta/n$; $g_{\max i}$ – текущее среднее значение сдвиговой деформации в некотором i -том слое.

Обработка имеющихся эпюр деформации и анализ полученных результатов позволили выявить следующие закономерности.

1. При сварке взрывом разнородных материалов (Cu +Al) по прямой схеме (метается медная пластина) расчетные значения работы деформации в метаемом и неподвижном элементах не отличаются друг от друга более, чем на 10%, т.е. энергия, затраченная на пластическое

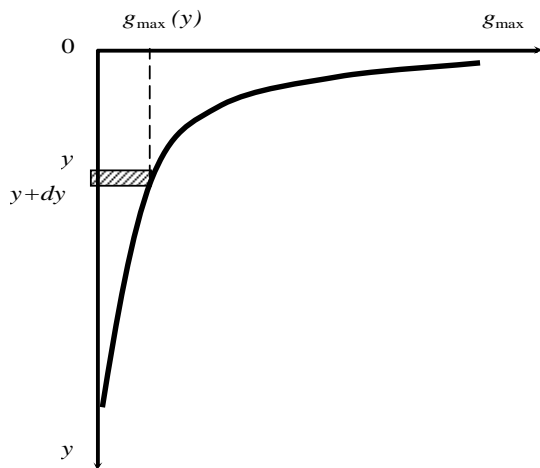


Рис. 4. Расчетная схема определения работы деформации

деформирование металла W_2 ОШЗ обеих пластин, распределяется между ними приблизительно поровну. Эта особенность сохраняется при варьировании в широком диапазоне режимов сварки.

2. При сварке по обратной схеме (метается алюминий) заметно большая часть энергии выделяется в алюминиевой пластине, превышая соответствующую величину в более прочной и плотной меди более, чем на 40%.

Так, например, при сварке по прямой схеме

на режимах $V_k = 2600$ м/с и $V_c = 350$ м/с на пластическую деформацию металла ОШЗ алюминиевой пластины расходуется $\sim 0,465$ МДж/м², медной – 0,448 МДж/м². При этом рассчитанное по [17] значение W_2 составляет 0,78 МДж/м². При сварке на тех же режимах по обратной схеме W_2 для алюминия составляет 0,56 МДж/м², для меди – всего 0,378 МДж/м². Такое различие в энергиях, по нашему мнению, можно связать с большей инерционностью меди, обладающей соответственно большей плотностью.

Приняв во внимание факт пропорциональности выделившегося в некотором произвольном слое металла, отстоящего от линии соединения на расстояние y , тепла элементарной работе деформирования, а также сделав допущение, что тепло во всех слоях выделяется одновременно, несложно оценить тепловую ситуацию в ОШЗ сварного соединения, т. е. рассчитать начальные температурные поля. Так для произвольного слоя y его температура в начальный момент времени $t = 0$ будет равна

$$T(y) = \frac{\delta A_d}{c \rho dy} + T_0, \quad (5)$$

где δA_d – элементарная работа деформации.

С учетом (2) уравнение (5) принимает вид¹:

$$T(y) = \frac{S_k g_{\max}(y) dy}{c \rho dy} + T_0 = \frac{S_k g_{\max}(y)}{c \rho} + T_0. \quad (6)$$

Теперь, зная закон изменения $g_{\max}(y)$ по толщине пластины, можно для произвольного сечения построить начальные температурные поля (рис. 5).

Построенные по рассмотренному методу кривые исходного распределения температуры в ОШЗ для одно- и разнородных материалов позволили качественно объяснить некоторые

¹Следует отметить, что зависимость (6) является справедливой лишь для случая, когда тепла, выделившегося в некотором слое недостаточно для его нагрева до температуры плавления. В противном случае в (6) следовало бы ввести слагаемое, учитывающее тепловые затраты на расплавление.

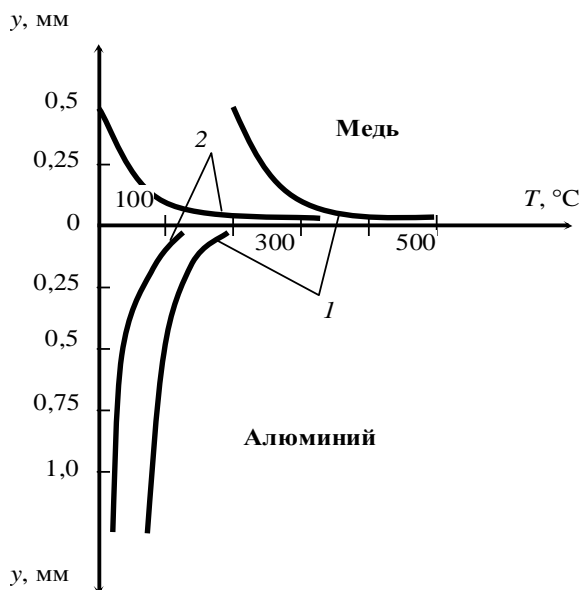


Рис. 5. Распределение температур в сечении сваренного взрывом медно-алюминиевого композита:

- 1 – $V_k = 2600$ м/с, $V_c = 350$ м/с;
2 – $V_k = 2000$ м/с, $V_c = 200$ м/с

явления и закономерности, проявляющиеся при сварке взрывом композиций из материалов с большим различием в температурах плавления.

Так, например, анализ начальных температурных полей в медно-алюминиевом биметалле (см. рис. 5) показывает, что находящиеся вблизи линии соединения слои меди нагреты до гораздо более высоких температур, чем симметрично расположенные относительно ЛС алюминиевые: для выбранных режимов (см. рис. 5, кривая 1) на удалении $\sim 0,03$ мм от границы раздела слоев температура достигает соответственно в меди и алюминии $450 \dots 500$ °C и $150 \dots 200$ °C. При этом не вызывает сомнения, что по мере асимптотического приближения к линии соединения температура имеет тенденцию к увеличению. Интенсификация режимов сварки, как это было показано выше, вызывает рост значений максимальных сдвигов в ОШЗ, приводя также к увеличению тепловыделений в приконтактных объемах металлов и соответственно к повышению их температуры.

Теперь становится очевидным, что при режимах сварки меди с алюминием, для которых характерно наличие оплавленного металла на

границе раздела слоев композиции, появление оплавов связано, прежде всего, с теплом, выделившимся в результате пластической деформации медного слоя. Сваренные на тех же режимах однородные алюминиевые и медные композиции свободны от указанных дефектов в силу явно недостаточной для расплавления температуры нагрева слоев, примыкающих к линии соединения.

Подобные факты наблюдаются и при сварке взрывом других композиций с входящими в их состав различающимися по физико-механическим свойствам материалами, например, алюминия со сталью [18], где при достижении некоторого уровня параметров соударения реализуется ситуация, когда в сварном шве образуются оплавы с низкой микротвердостью, сформированные преимущественно за счет алюминия. В этом случае согласно нашим рассуждениям появление в зоне соединения участков оплавленного алюминия связано с теплом, выделившимся в приконтактных слоях стали, температура которых выше $T_{\text{пл}}^{\text{Al}}$, но ниже $T_{\text{пл}}^{\text{Ст}}$. Интенсификация режимов сварки, а, следовательно, повышение степени пластической деформации в ОШЗ приводит к постепенному изменению стехиометрического состава оплавленного металла: в его формирование вовлекается все больше железа (до $\sim 20\%$ [18]), а микротвердость увеличивается до $4500 \dots 5000$ МПа, что свидетельствует о присутствии здесь низкопластичных твердых интерметаллидных фаз системы Al_nFe_m . Последнее указывает на то, что достигнут такой уровень сдвиговой деформации, при котором тепла, выделившегося в стали, становится достаточным для расплавления ее приконтактных слоев.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что характер пластического течения металла ОШЗ в условиях высокоскоростного соударения разнородных материалов

зависит от параметров процесса и схемы сварки. При этом наиболее существенное влияние как на величину реализуемых в непосредственной близости максимальных g_{\max} , так и глубину зоны вовлечения металла в пластическое течение металла свариваемых разнородных элементов, оказывает скорость соударения V_c , увеличение которой при $V_k = \text{const}$ приводит к вовлечению в пластическое течение более глубоко расположенных слоев металла и росту реализуемых в непосредственной близости от линии соединения сдвиговых деформаций g_{\max} . Подобное влияние оказывает и снижение скорости точки контакта V_k при постоянной скорости соударения V_c .

2. При сварке взрывом материалов с различными физико-механическими свойствами существенно большая степень локализации пластических деформаций проявляется в металлах, обладающих более высокими прочностными свойствами, что приводит к сосредоточению тепловой энергии, выделившейся за счет прошедшей пластической деформации, в узкой околошовной зоне последних и, как следствие, к возможному оплавлению за счет этого тепла менее прочного и, как правило, менее тугоплавкого материала свариваемой пары.

Библиографический список

1. Кривенцов, А. Н. О роли пластической деформации металла в зоне соединения при сварке взрывом / А. Н. Кривенцов, В. С. Седых // Физика и химия обработки материалов. – 1969. – №1. – С.132-141.
2. О механизме пластической деформации при сварке взрывом / А. Н. Кривенцов, В. С. Седых, И. П. Краснокутская и др. // Физика и химия обработки материалов. – 1969. – №6. – С.99-102.
3. Каракозов, Э. С. Соединение металлов в твердой фазе / Э. С. Каракозов. – М.: Металлургия, 1976. – 264 с.
4. Пластическое течение металла в околошовной зоне соединений, полученных сваркой взрывом на низкоинтенсивных режимах / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, В. Г. Шморгунов, В. Н. Корнеев // Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – Волгоград: изд. Волгогр. политехн. ин-та. – 1991. – С.39-46.
5. Седых, В. С. Исследование характера течения металла при высокоскоростном плакировании взрывом на слоистых моделях / В. С. Седых, А. П. Соннов, В. Г. Шморгунов // Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – Волгоград: изд. Волгогр. политехн. ин-та. – 1988. – С.82-90.
6. Шморгунов, В. Г. Исследование основных закономерностей процесса пластической деформации при сварке взрывом / В. Г. Шморгунов // Сварочное производство. – 2000. – №3. – С.23-25.
7. Новая методика исследования пластической деформации металла в околошовной зоне свариваемых взрывом соединений / С. В. Кузьмин, Е. А. Чугунов, В. И. Лысак, А. П. Пеев // Физика и химия обработки материалов. – 2000. – №2. – С.54-60.
8. Гульбин, В. Н. Использование экспериментальных методов исследования процессов ОМД применительно к сварке взрывом / В. Н. Гульбин // Сварка, резка и обработка сварных соединений взрывом: сб. науч. Тр. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона. – 1987. – С.28-33.
9. Дерибас, А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом / А. А. Дерибас. – Новосибирск: Наука, 1980. – 222 с.
10. Гульбин, В. Н. Деформация в биметалле при высокоскоростной сварке / В. Н. Гульбин, К. К. Красиков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерная техника и технология. – Вып. 5. – 1989. – С.29-33.
11. Об оценке величин деформаций в приконтактных зонах, сваренных взрывом соединений металлографическим методом / А. Н. Кривенцов, А. В. Лазарев, Ю. П. Трыков, А. И. Улитин // Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – Волгоград: изд. Волгогр. политехн. ин-та. – 1975. – ч.2. – С.55-61.
12. Бондарь, М. П. О пластической деформации в зоне соединения при плакировании взрывом / М. П. Бондарь, В. М. Оголихин // Физика горения и взрыва. – 1985. – Т.21. – №2. – С.147-157.
13. Основные закономерности деформирования металла околошовной зоны при сварке взрывом алюминия / Е. А. Чугунов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. П. Пеев // Физика и химия обработки материалов. – 2001. – №3. – С.39-44.
14. Формирование соединения при сварке металлов взрывом / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Е. А. Чугунов, А. П. Пеев // Автоматическая сварка. – 2000. – №11. – С. 25-29.
15. Золотаревский, В. С. Механические испытания и свойства металлов / В. С. Золотаревский. – М.: Металлургия, 1974. – 302 с.
16. Гольке, В. Физические исследования высокоскоростного деформирования металлов / В. Гольке // Физика быстропротекающих процессов / Под ред. Златина Н. А. – М., 1971. – Т. 2. – С. 69-100.
17. Седых, В. С. Расчет энергетического баланса процесса сварки взрывом / В. С. Седых, А. П. Соннов // Физика и химия обработки материалов. – 1970. – №2. – С. 6-13.
18. Производство металлических слоистых композиционных материалов / А. Г. Кобелев, В. И. Лысак, В. Н. Чернышев и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 496 с.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 02.523.12.3021.