



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЕ ПРИ СВАРКЕ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ВЗРЫВОМ

А. П. ПЕЕВ, канд. техн. наук, С. В. КУЗЬМИН, д-р техн. наук, В. И. ЛЫСАК, канд. техн. наук
(Волгоград. гос. техн. ун-т, РФ)

Представлена расчетно-экспериментальная методика оценки тепловой ситуации в околошовной зоне сваренных взрывом разнородных металлов с резко отличающимися физико-механическими свойствами. Показано, что образования оплавов на границе раздела слоев композита связаны с теплом, выделившимся в результате пластической деформации в более прочном металле.

Ключевые слова: сварка взрывом, одно- и разнородные металлы, околошовная зона, сдвиг, пластическая деформация, распределение температуры

Процесс сварки металлов взрывом сопровождается резким повышением температуры в зоне соединения, о чем свидетельствуют изменения структуры металла околошовной зоны (участки рекристаллизации, литого металла, образование неравновесных структур и химических соединений и др.), что объясняется трансформацией энергии деформирования в тепловую энергию [1–3 и др.]. В работах [4–8 и др.] предприняты различные подходы к решению тепловой задачи при сварке металлов взрывом, однако ни одна из предложенных моделей не учитывает взаимосвязь между высокоскоростной пластической деформацией приконтактных объемов металла околошовной зоны и выделившимся в результате этого теплом. Кроме того, следует отметить, что тепло, выделяемое в этих объемах, распределяется крайне неравномерно из-за существования градиента деформации.

В связи с изложенным выше целью настоящей работы явилась расчетно-экспериментальная оценка тепловой ситуации в околошовной зоне при сварке металлов взрывом на основе анализа распределения энергии пластической деформации между слоями.

Полная работа деформации определяется интегрированием элементарных работ по y

$$A = S_k \int_0^{\delta} \epsilon(y) dy, \quad (1)$$

где $\epsilon(y)$ — текущее значение деформации; δ — толщина исследуемой пластины; S_k — сопротивление материала деформированию (или предельная прочность материала, зависящая от временного сопротивления разрыву и относительного сужения), численно равно динамическому пределу текучести ($S_k^{Cu} = 640$ МПа, $S_k^{Al} = 108$ МПа [9]).

При вычислении интеграла воспользуемся приближенным методом прямоугольников, для чего интервал интегрирования от нуля (линия соединения) до δ (толщина пластины) разобьем на n равных частей и для точек деления $y_1, y_2, \dots, y_{n-1}, y_n$

вычислим значение интегрируемой функции $\epsilon(y)$. Тогда приближенное значение A_{∂} будет равно:

$$A_{\partial} = \sum_{i=1}^n \Delta A_{\partial_i} = S_k \Delta y \sum_{i=1}^n g_{\max_i}, \quad (2)$$

где $\Delta y = \delta/n$; g_{\max_i} — текущее среднее значение сдвиговой деформации, реализующейся в некотором i -м слое (рис. 1).

Обработка имеющихся эпюр $g_{\max} = f(y)$ и анализ полученных результатов позволили выявить следующие закономерности:

1) в случае сварки взрывом одноименных (Al+Al) материалов (рис. 2, а, в) расчетные значения работы деформации в метаемом и неподвижном элементах не отличаются друг от друга более чем на 10 %, т. е. энергия, затраченная на пластическую деформацию металлов обеих пластин, разделяется между ними приблизительно поровну. Эта закономерность сохраняется при варьировании в широком диапазоне режимов сварки;

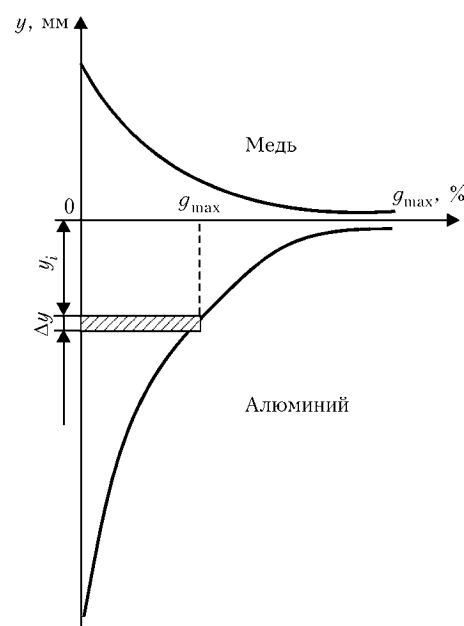


Рис. 1. Схема к методике расчетной оценки работы сдвиговой деформации

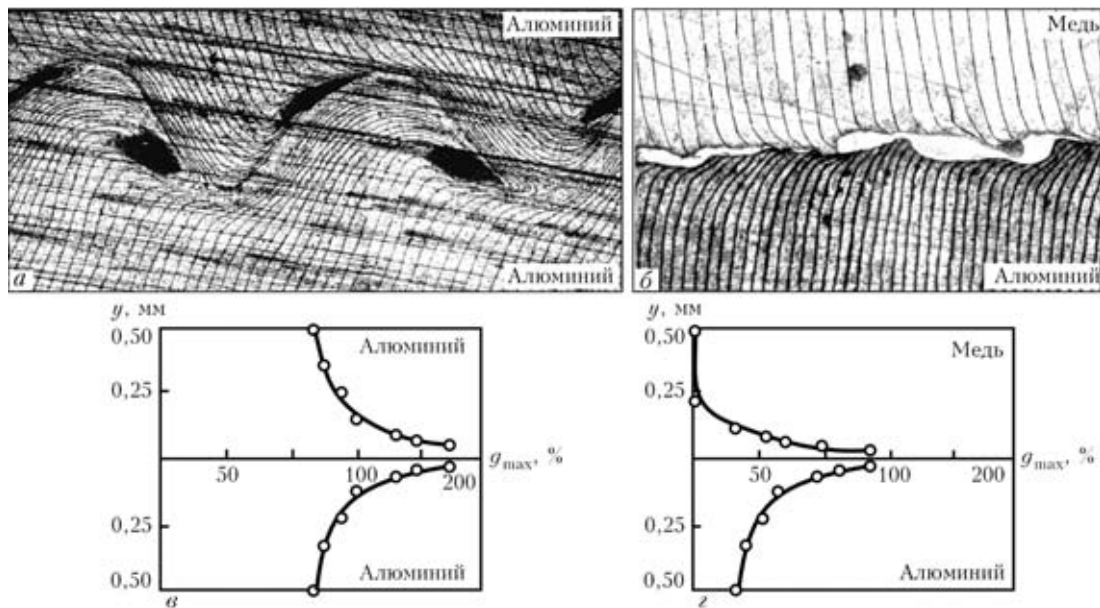


Рис. 2. Макроструктура слоистой поперечной модели (а, б) и эпюры деформаций (в, з) при сварке взрывом однородных (а) и разнородных (б) металлов на идентичных режимах ($v_k = 2000$, $v_c = 350$ м/с) [10]

2) аналогичное распределение энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию, наблюдается и в случае сварки взрывом меди с алюминием (рис. 2, б, з) по прямой схеме (медь — метаемый элемент). При использовании же обратной схемы заметно большая часть энергии выделяется в метаемой алюминиевой пластине, превышая соответствующее значение в меди более чем на 40 %, что, по-видимому, связано с дополнительным деформированием менее прочной алюминиевой пластины, испытывающей до соударения двойной изгиб.

Так, например, при сварке по прямой схеме на режимах $v_k = 2600$ м/с и $v_c = 350$ м/с на пластическую деформацию металла околошовной зоны алюминиевого элемента затрачивается примерно $0,46$ МДж/м², медного — $0,45$ МДж/м² (при этом расчетное значение $W_2 = 0,78$ МДж/м²) [1]; при сварке на тех же режимах по обратной схеме $W_2^{Al} = 0,56$ МДж/м², для меди W_2^{Cu} — всего лишь $0,38$ МДж/м².

Оценим теперь тепловую ситуацию в сварном медно-алюминиевом соединении, исходя из того факта, что практически вся энергия, затраченная на пластическую деформацию металла, переходит в тепло [1–3 и др.]. Вполне очевидно, что тепло, выделившееся в медной и алюминиевой пластинах, соответственно пропорционально W_2^{Al} и W_2^{Cu} . Причем это тепло распределяется во всем образце по его толщине крайне неравномерно: наибольшая его часть выделяется в приконтактных слоях металлов, где реализуются максимальные деформации и соответственно затрачивается большая часть работы деформирования. Из определенных ранее по зависимостям (1), (2) значений работ деформации в каждом слое сварного соединения толщиной Δy (Δy в нашем случае составляет $0,03$ мм) и, основываясь на допущении, что в некоторый момент времени одновременно во всех рассматриваемых

слоях выделяется тепло, пропорциональное работе, затраченной на деформирование каждого слоя, несложно в первом приближении рассчитать начальные температурные поля в некотором сечении биметалла.

Так, для произвольного i -го слоя его температура в начальный момент времени будет равна:

$$T_i = \frac{\Delta A_{\partial}}{C \Delta y \rho} + T_0 \quad (3)$$

или

$$T_i = \frac{S_k \Delta y g_{\max_i}}{C \Delta y \rho} + T_0 = \frac{S_k g_{\max_i}}{C \rho} + T_0, \quad (4)$$

где C — удельная теплоемкость металла; ρ — плотность металла; T_0 — начальная температура свариваемых элементов¹.

Расчетное распределение температуры в биметалле медь-алюминий, сваренного на различных режимах, показано на рис. 3. Анализ полученных зависимостей показывает, что находящиеся вблизи линии соединения слои меди нагреты до гораздо больших температур, чем прилегающие к линии соединения алюминиевые (это связано с различием S_k и C для этих материалов), при этом определенные расчетно-графическим способом максимальные значения температуры нагрева слоев приконтактных объемов, сваренных взрывом металлов по мере асимптотического приближения к линии соединения, имеют тенденцию к увеличению. Интенсификация режимов сварки вызывает рост значений максимальных сдвигов g_{\max} вблизи линии соединения [3, 10, 11 и др.], приводя к увеличению

¹ Следует заметить, что зависимость (3) является справедливой лишь для случая, когда тепла, выделившегося в некотором слое недостаточно для его нагрева до температуры плавления. В противном случае в (3) следовало бы ввести слагаемое, учитывающее тепловые затраты на расплавление.

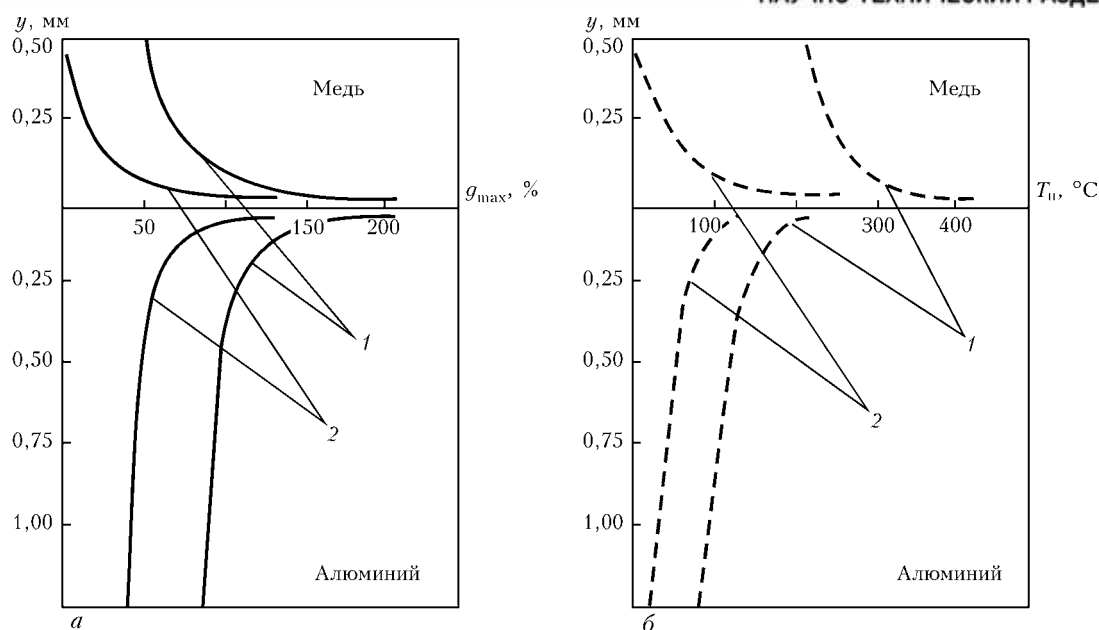


Рис. 3. Эпюры максимальных сдвигов (а) и распределения температур (б) в сечении сваренного взрывом медно-алюминиевого композита

тепловыделения в приконтактных объемах металла и соответственно к повышению их температуры.

Таким образом, вполне очевидно, что при сварке взрывом меди с алюминием появление оплавленного металла на границе раздела слоев композита прежде всего связано с теплом, выделившимся в медном слое в результате пластической деформации, достаточным для расплавления приконтактных слоев более легкоплавкого алюминия.

Сравним тепловые ситуации при сварке взрывом одно- и разнородных металлов для режимов соударения, характеризующихся появлением у последних участков оплавленного металла на границе соединения. В качестве исходных данных воспользуемся эпюрами деформаций, построенными по экспериментальным данным работ [10, 11] для случая сварки взрывом меди с алюминием ($v_k = 2600$, $v_c = 350$ м/с) с использованием методики [12], позволяющей достоверно оценивать максимальные сдвиги на удалении не менее 30 мкм.

Расчет значений температур околошовной зоны по зависимостям (1)–(4) показывает, что при сварке взрывом однородных (алюминиевых) пластин приконтактный слой, удаленный от линии соединения на расстояние 30 мкм, нагреется не более чем до 150 °С, при сварке медных пластин расчетное значение температур возрастает до 650 °С и появления участков оплавленного металла в обоих случаях не наблюдается, поскольку температура приконтактных слоев меньше температуры плавления соответствующих металлов.

При сварке взрывом меди с алюминием по схеме, когда metaемым элементом является медь, значения температур околошовной зоны, рассчитанные для слоя, удаленного от линии соединения на 30 мкм, составляют примерно 450 и 150 °С соответственно для меди и алюминия. Однако на границе раздела слоев наблюдаются участки оплавленного металла, что свидетельствует о достижении более высоких температур на расстоянии

от линии соединения менее 30 мкм. Решив уравнение (4) относительно g_{max} и полагая, что в приконтактном медном слое достигнута температура плавления алюминия, можно оценить уровень сдвиговых деформаций, при которых медь нагреется до температуры плавления алюминия, он составляет около 350 %, при этом приконтактный слой алюминия за счет собственного тепла нагреется до температуры не более 250 °С.

Подобное наблюдается при сварке взрывом стали с алюминием, где при достижении некоторого уровня параметров соударения реализуется ситуация, когда в сварном шве сначала образуются расплавы чистого алюминия. В этом случае, согласно нашим рассуждениям, появление расплава алюминия связано с теплом, выделившимся в приконтактных слоях стали, температура которых выше температуры плавления алюминия, но ниже температуры плавления стали. Интенсификация режимов сварки приводит к изменению стехиометрического состава оплавленного металла, и процентное содержание железа в нем возрастает. Это указывает на то, что достигнут такой уровень сдвиговой деформации, при котором тепла, выделившегося в стали, уже достаточно и для ее оплавления.

Таким образом, расчетно-экспериментальная методика оценки тепловой ситуации в околошовной зоне сваренных взрывом разнородных металлов с резко различными физико-механическими свойствами позволяет объяснить причину образования оплавов в сварном шве при режимах, обеспечивающих в случае сварки взрывом однородных металлов, составляющих композит, бездефектную зону соединения.

Выводы

1. Установлено, что на сдвиговую пластическую деформацию при сварке взрывом одно- и разнородных металлов затрачивается приблизительно равное количество энергии. Эта закономерность



сохраняется при варьировании в широком диапазоне режимов сварки.

2. Показано, что при сварке взрывом разнородных металлов с резко различными физико-механическими свойствами появление оплавленного металла на границе раздела слоев композита прежде всего связано с теплом, выделившимся в результате протекания пластической деформации в более прочном и тугоплавком металле, достаточным для расплавления приконтактных слоев более легкоплавкого металла.

1. *Седых В. С., Соинов А. П.* Расчет энергетического баланса процесса сварки взрывом // Физика и химия обработки материалов. — 1970. — № 2. — С. 6–13.
2. *Лысак В. И., Седых В. С.* Влияние параметров сварки взрывом на характер распределения энергии в соударяющихся пластинах // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: Волгоград. политехн. ин-т, 1986. — С. 34–47.
3. *Производство* слоистых композиционных материалов / А. Г. Кобелев, В. И. Лысак, В. Н. Чернышов и др. — Минск: Интермет Инжиниринг, 2002. — 496 с.
4. *Захаренко И. Д.* Сварка металлов взрывом. — Минск: Наука і тэхніка, 1990. — 205 с.

5. *Кудинюв В. М., Коротеєв М. Я.* Сварка взрывом в металлургии / Под ред. Э. С. Каракозова. — М.: Металлургия, 1978. — 168 с.
6. *Расчет* тепловых процессов при сварке взрывом разнородных металлов / В. М. Хрипунов, Е. П. Покатаев и др. // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: Волгоград. гос. техн. ун-т, 2000. — С. 43–47.
7. *Бердыченко А. А.* О распределении температур в околошовной зоне при сварке взрывом // Там же. — С. 47–53.
8. *Покатаев Е. П., Хрипунов В. М., Покатаева В. М.* Аналитическое исследование тепловых процессов в сваренных взрывом плоских элементах // Там же. — 1998. — С. 84–92.
9. *Смелянский В. Я., Рыскулов М. Т., Кожевников В. Е.* К вопросу о расчете режимов сварки взрывом разнородных материалов // Там же. — 1986. — С. 54–62.
10. *Особенности* пластического деформирования металла околошовной зоны при сварке взрывом меди с алюминием / А. П. Пеев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Е. А. Чугунов // Физика и химия обработки материалов. — 2003. — С. 71–76.
11. *Формирование* соединения при сварке металлов взрывом / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Е. А. Чугунов, А. П. Пеев // Автомат. сварка. — 2000. — № 11. — С. 25–29.
12. *Новая* методика исследования пластической деформации металла в околошовной зоне свариваемых взрывом соединений / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Е. А. Чугунов, А. П. Пеев // Физика и химия обработки материалов. — 2000. — № 2. — С. 54–60.

A design-experimental procedure is presented for evaluation of the thermal pattern in the HAZ of explosion welded dissimilar metals with markedly different physico-mechanical properties. It is shown that appearance of surface melting on the interface of composite layers is related to the heat, evolving as a result of plastic deformation in the stronger metal.

Поступила в редакцию 05.05.2003



3-я Международная конференция по сварочным материалам

Разработка, технология, производство, качество



1–4 июня 2004

г. Днепропетровск

Организаторы:

Ассоциация «Электрод» предприятий СНГ
ОАО «Днепрометиз»

При поддержке

Межгосударственного Научного совета по сварке и родственным технологиям, ИЭС им. Е. О. Патона,
Общества сварщиков Украины,
Российского научно-технического сварочного общества

Контактный тел./факс: (38044) 227 72 35