

УДК 621.791.76: 621.7.044.2

*О. В. Строков, инженер, В. И. Кузьмин, к-т техн. наук,  
В. И. Лысак, д-р техн. наук, В. В. Литвинов, инженер*

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ СТАЛЕАЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИТА С ПРОСЛОЙКОЙ ХРОМА

Волгоградский государственный технический университет, weld@vstu.ru

С помощью методики слоистых моделей со вставками исследованы особенности пластического течения металла околошовной зоны сваренного взрывом композита «алюминий+хром+сталь». Изучено влияние толщины прослойки хрома и кинематических параметров сварки взрывом на величину и характер распределения сдвиговой деформации.

The peculiarities of plastic flow of a metal in the weld zone of the explosion-welded “aluminum + chrome + steel” composite were investigated with the method of laminated models. Effects of chrome interlayer thickness as well as kinetic parameters of explosive welding on the values and distribution of shear strain were studied.

**Ключевые слова:** сварка взрывом, пластическая деформация, слоистая модель, антидиффузионная прослойка

**Keywords:** explosive welding, plastic deformation, laminated model, antidiffusion layer

### Введение

В процессе сварки взрывом определяющим фактором для получения равнопрочного соединения, как и при других способах сварки давлением, является реализация совместной пластической деформации в околошовной зоне (ОШЗ) соединяемых металлов. При этом равнопрочное сварное соединение может быть получено при выполнении следующих условий [1]:

$$g_{\max}^{\text{кр}} \leq g_{\max} \leq g_{\max}^{\text{пр}} \quad (1)$$

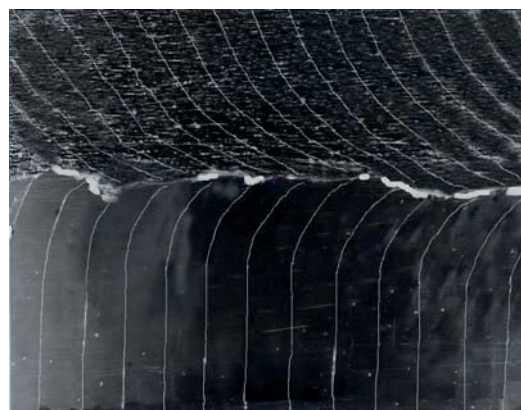
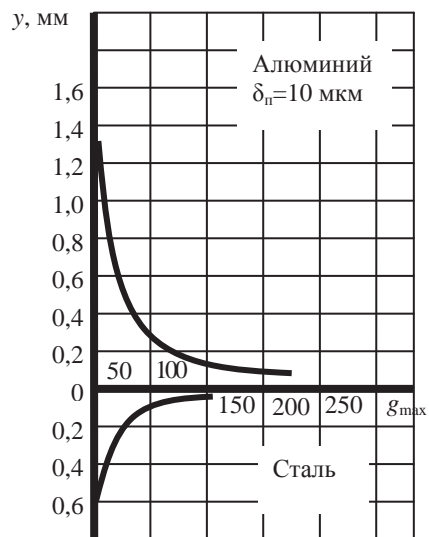
где  $g_{\max}$  – максимальные сдвиговые деформации, реализуемые в приконтактной зоне соударения свариваемых металлов;  $g_{\max}^{\text{кр}}$  – критическое значение сдвиговых деформаций;  $g_{\max}^{\text{пр}}$  – предельное значение сдвиговых деформаций.

Скоротечность процесса сварки взрывом затрудняет его исследование во время образования соединения, поэтому анализ основных закономерностей деформирования металла в ОШЗ проводится по картинам (фотографиям) остаточных деформаций в сваренных металлах. Для определения остаточных сдвиговых деформаций в сваренных взрывом образцах применяют различные экспериментальные методики с использованием координатных сеток [2],

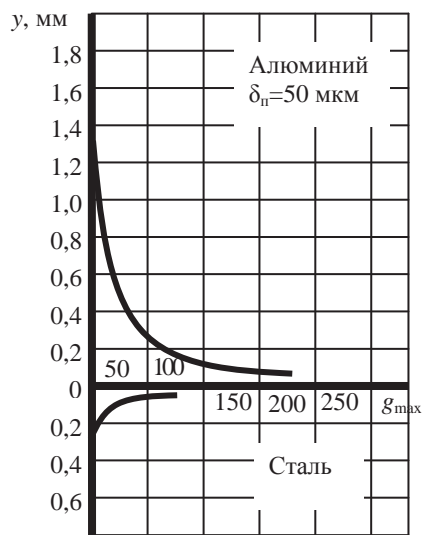
проволочных вставок [3], слоистых моделей [4] и других [5, 6]. В последнее время исследователи чаще используют различные варианты сочетания и расположения на свариваемых пластинах слоистых моделей со вставками, что позволяет более точно оценить величину и характер пластической деформации металлов в ОШЗ [7 ... 10]. При этом большинство публикаций посвящено исследованию закономерностей пластической деформации при сварке взрывом однородных пар металлов. Работ, посвященных изучению пластической деформации в ОШЗ разнородных металлов с резко отличающимися физико-механическими свойствами (например, алюминий-сталь, алюминий-медь, сталь-медь и др.) крайне мало, а именно такие сочетания материалов представляют наибольший как практический так и научный интерес в области получения с помощью сварки взрывом новых композиционных материалов.

### Материалы и методы исследования

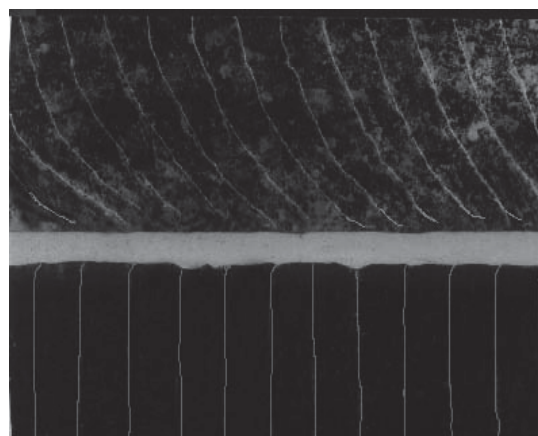
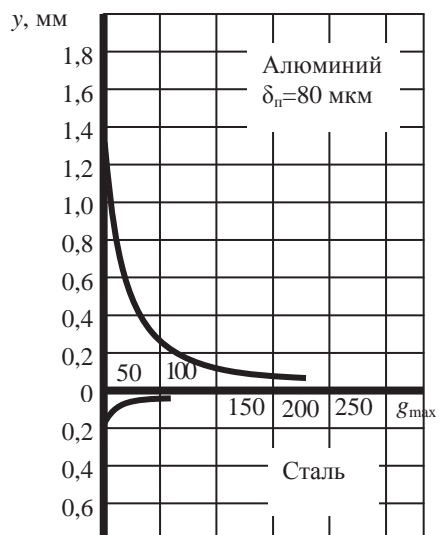
В качестве материалов исследования применяли алюминий А5 толщинами 6 и 8 мм и сталь Ст. 3 толщиной 10 мм. Перед хромированием стальные образцы полировались, после чего погружались в электролизную ванну. Хромиро-



а)



б)



в)

Рис. 1. Эпюры максимальных сдвиговых деформаций  $g_{max}$  металла в ОШЗ и продеформированные слои сваренного взрывом сталеалюминиевого композита при разной толщине прослойки хрома

вание стальных образцов проводили в заводских условиях методом гальваники до получения по всей поверхности слоя хрома толщиной 0,01...0,1 мм. В качестве электролита для хромирования стали использовали хромовый ангидрид и серную кислоту. Сварку взрывом осуществляли на оптимальных для данной пары режимах, обеспечивающих получение высокой прочности соединения слоев.

Для исследования пластического деформирования металла ОШЗ применялась плоскопараллельная схема сварки взрывом с использованием методики слоистых моделей со вставками, реализация которой осуществлялась следующим образом. В неподвижной стальной и алюминиевой пластинах выфрезеровывали специальное окно-колодец со стенками, строго перпендикулярными её поверхностям, в которое без зазоров с помощью запрессовки устанавливали поперечную (перпендикулярно расположенную) слоистую модельную вставку.

Для определения максимальной сдвиговой деформации  $g_{\max}$  по методу [11] применяли специально разработанную программу «EWD 1.0», функционирующую в среде MS Windows. Металлографические исследования выполняли на микроскопе OLYMPUS BX61.

### Обсуждение результатов

Полученные результаты исследований показали, что толщина прослойки хрома оказывает существенное влияние на величину остаточной пластической деформации стального слоя при сварке взрывом сталеалюминиевого композита. Так при толщине прослойки хрома 10 мкм максимальная остаточная сдвиговая деформация  $g_{\max}$ , измеренная в непосредственной близости от границы раздела слоев, в алюминии составляет около 170 %, а в стали – около 110 %. Граница соединения ОШЗ имеет слабо выраженный волнообразный профиль с отдельными участками без слоя хрома, частичный вынос которого обусловлен кумулятивным эффектом

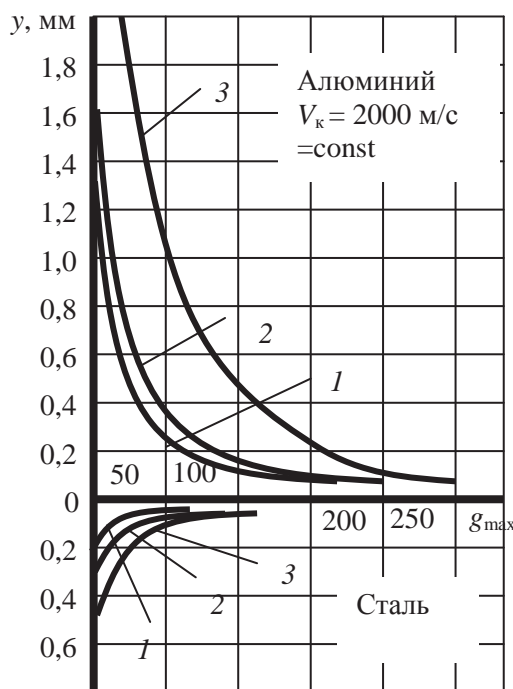


Рис. 2. Влияние скорости соударения  $V_c$  на эпюры максимального сдвига  $g_{\max}$  металла ОШЗ сваренного взрывом сталеалюминиевого композита с прослойкой хрома



Рис. 3. Деформация поперечной слоистой модели сваренного взрывом сталеалюминиевого композита с частичным разрушением прослойки хрома при  $V_c = 500$  м/с

(рис. 1, а). При этом следует отметить, что толщина деформированного слоя со стороны алюминия составляет 1,3 мм, а со стороны стали она в два раза меньше и составляет 0,6 мм.

С увеличением толщины прослойки хрома до 40 ... 50 мкм (при тех же постоянных значениях параметров сварки взрывом  $V_c = 300$  м/с,  $V_k = 2000$  м/с) максимальная остаточная сдвиговая деформация стального слоя уменьшается и составляет  $g_{max} = 70 \dots 80 \%$ . Максимальная остаточная сдвиговая деформация алюминиевого слоя остается неизменной, равной 170 %. Зона соединения имеет прямолинейный безволновой профиль без хрупких оплавов с равномерной толщиной прослойки хрома по всей границе контакта слоев (рис. 1, б). Толщина деформированного металла со стороны стали уменьшается и составляет 0,25...0,30 мм.

При дальнейшем увеличении толщины прослойки хрома до 80 мкм вид границы соединения ОШЗ остается неизменным (с прямолинейный безволновым профилем), наблюдается только изменение максимальной остаточной сдвиговой деформации в стальном слое, в котором  $g_{max}$  уменьшается до 60 %, а толщина деформированного металла уменьшается до

0,15 мм (рис. 1, в).

Изучение влияния кинематических параметров процесса сварки взрывом на величину максимальной остаточной сдвиговой деформации в ОШЗ сталеалюминиевого композита с прослойкой хрома показало, что наибольшее влияние на  $g_{max}$  оказывает скорость соударения  $V_c$ . Экспериментально установлено, что с увеличением скорости соударения  $V_c$  при постоянной величине скорости контакта  $V_k$  наблюдается существенный рост значений  $g_{max}$  и толщины деформированного металла у как со стороны алюминия, так и со стороны стали. Так, при скорости соударения  $V_c = 300$  м/с значения  $g_{max}$ , измеренные на удалении от границы раздела слоев  $y = 0,05$  мм, со стороны алюминия составляли 170 %, а со стороны стали – 70 %.

С увеличением расстояния до  $y = 0,1$  мм максимальная остаточная сдвиговая деформация уменьшается как со стороны стали, так и со стороны алюминия и составляет 30 и 100 % соответственно. При этом толщина деформированного металла для алюминия составляет 1,3 мм, для стали – 0,2 мм (рис. 2). С увеличением скорости соударения до 500 м/с значения максимальных сдвиговых деформаций  $g_{max}$ ,

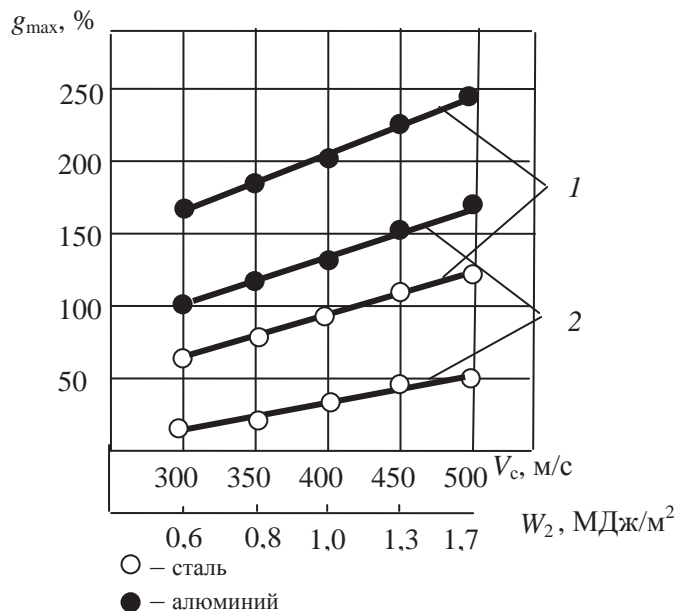


Рис. 4. Влияние скорости соударения  $V_c$  и энергии  $W_2$  на величину максимальных сдвигов  $g_{\max}$  по толщине модельных образцов:  
1 –  $y = 0,05$  мм; 2 –  $y = 0,1$  мм

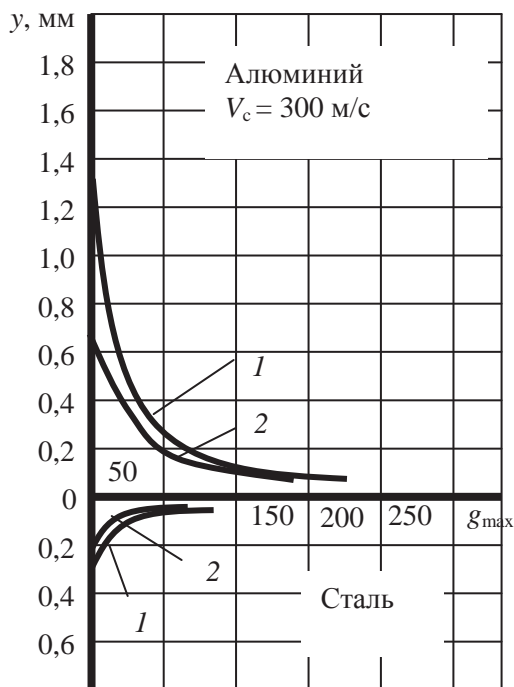


Рис. 5. Влияние скорости контакта  $V_k$  на величину максимальных сдвигов  $g_{\max}$  металла ОШЗ сваренного взрывом сталеалюминиевого композита с прослойкой хрома:  
1 –  $V_k = 1800$  м/с; 2 –  $V_k = 2500$  м/с

измеренные на удалении от границы раздела слоев  $y = 0,05$  мм, со стороны алюминия возрастают до 250 %, а со стороны стали – до 120 %. При этом, если толщина деформированного слоя со стороны алюминия составляла

2,8 мм, то со стороны стали она увеличилась более чем в 6 раз и составляла 0,45 мм (рис. 2).

Следует отметить, что создание таких больших пластических деформаций приводит к появлению трещин и даже разрушению анти-

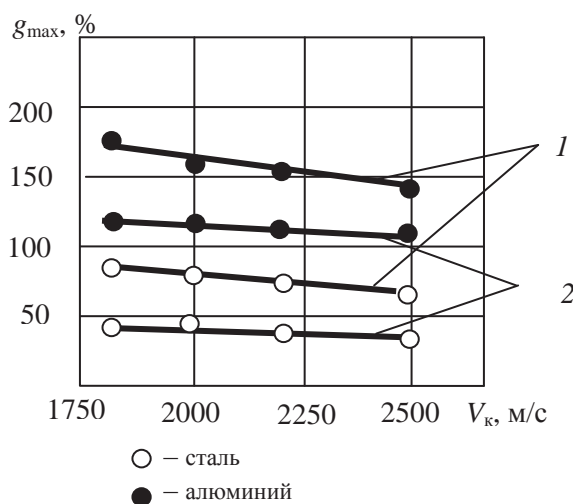


Рис. 6. Влияние скорости контакта  $V_k$  на величину максимальных сдвигов  $g_{max}$  по толщине модельных образцов:  
 1 –  $y = 0,05$  мм; 2 –  $y = 0,1$  мм

диффузионной прослойки (рис. 3), а, следовательно, снижается термостойкость сваренного взрывом сталеалюминиевого композита. Это объясняется тем, что с увеличением скорости соударения с 300 до 500 м/с происходит увеличение более чем в 3 раза энергии  $W_2$ , затрачиваемой на пластическую деформацию (т. к.  $W_2$  прямопропорциональна  $V_c^2$ ), в результате этого в ОШЗ реализуются значительные сдвиговые деформации, приводящие к разрушению слоя хрома (рис. 4).

Исследование влияния скорости контакта  $V_k$  на величину максимальной остаточной сдвиговой деформации в ОШЗ показало, что с увеличением  $V_k$  (при постоянной величине скорости соударения  $V_c$ ) контакта наблюдается уменьшение  $g_{max}$  как со стороны алюминия, так и со стороны стали. Установлено, что при  $V_k = 1800$  м/с значение максимальных сдвигов, зафиксированных в непосредственной близости от линии соединения, составляют 170 % со стороны алюминия и около 80 % – со стороны стали. При этом толщина деформированного металла для алюминия составляет 1,4 мм, для ста-

ли – 0,25 мм (рис. 5).

С увеличением  $V_k$  контакта до 2500 м/с максимальная остаточная сдвиговая деформация со стороны алюминия уменьшается до 140 %, а со стороны стали  $g_{max}$  – до 70 % (рис. 6).

### Выводы

1. Анализ проведенных исследований показал, что введение между алюминием и сталью тонкой прослойки хрома в процессе сварки взрывом не препятствует пластическому деформированию стали в ОШЗ, тем самым создавая благоприятные условия для получения равнопрочного соединения за счет создания антидиффузионного барьера, который препятствует образованию хрупких оплавок. С увеличением толщины прослойки хрома с 10 до 80 мкм при постоянных параметрах режима сварки взрывом максимальная статочная сдвиговая деформация  $g_{max}$  алюминиевого слоя остается неизменной, равной 170%, в то время как  $g_{max}$  стального слоя уменьшается почти в два раза, составляя около 60%.

2. Экспериментально установлено, что наибольшее влияние на величину сдвиговых де-



формаций сваренного взрывом сталеалюминиевого композита с прослойкой хрома оказывает скорость соударения  $V_c$ , увеличение которой (при  $V_k = \text{const}$ ) приводит к вовлечению в пластическое течение более глубоко расположенных слоев и существенному росту реализуемых в ОШЗ сдвиговых деформаций  $g_{\text{max}}$ , при больших значениях которой происходит разрушение антидиффузионной прослойки хрома.

#### Библиографический список

1. Краснокутская, И. П. О механизме пластической деформации при сварке взрывом / И.П. Краснокутская, А. Н. Кривенцов, В. С. Седых, Соннов А. П. // Физика и химия обработки материалов. – 1969. – №6. – С. 99-102.
2. 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.
3. Захаренко, И. Д. Сварка металлов взрывом / И. Д. Захаренко – Минск: Наука и техника, 1990. – 205 с.
4. Седых, В. С. Исследование характера течения металла при высокоскоростном плакировании взрывом на слоистых моделях / В. С. Седых, А. П. Соннов, В. Г. Шморгун // В межвуз. сб. науч. статей: Сварка взрывом и свойства сварных соединений / Волгоград: ВПИ, 1988. – С. 82-92.
5. Бондарь, М. П., Оголихин В.М. О пластической деформации в зоне соединения при плакировании взрывом / М. П. Бондарь, В. М. Оголихин // Физика горения и взрыва. – 1985. – Т.21. – С.147-157.
6. Гульбин, В. Н. Использование экспериментальных методов исследования процессов ОМД применительно к сварке взрывом / В. Н. Гульбин // В сб. науч. статей: Сварка, резка и обработка сварных соединений взрывом / Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1987. – С.28-33.
7. Шморгун, В. Г. Исследование основных закономерностей процесса пластической деформации при сварке взрывом / В. Г. Шморгун // Сварочное производство. – 2000. – №3. – С. 23-25.
8. Кузьмин, С. В. 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.
9. Чугунов, Е. А. 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.
10. Пеев, А. П. 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. – №1. – С. 71-76.
11. Кузьмин, С. В. Разработка методики исследования пластической деформации металла в ОШЗ свариваемых взрывом соединений / С. В. Кузьмин, Е. А. Чугунов, В. И. Лысак, А. П. Пеев // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. трудов.- ВолгГТУ. – Волгоград, 1998. – С. 65-74.