

## ОСОБЕННОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛА ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЫ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ ПО СХЕМЕ ДВУСТОРОННЕГО СИММЕТРИЧНОГО ПЛАКИРОВАНИЯ

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

Представлены результаты анализа деформационно-временных условий формирования соединения и пластического деформирования приконтактных слоев металла при сварке металлов взрывом по различным схемам соударения.

*Ключевые слова:* сварка взрывом, плоскопараллельная и батарейная схемы сварки, сварные соединения, приграничные объемы металла, пластическое деформирование металла

Одним из факторов, определяющих образование соединения при сварке взрывом, является интенсивная совместная пластическая деформация металла соударяющихся пластин. Исследования авторов работ [1–8] позволили выявить и обобщить основные закономерности пластического деформирования металла в околошовной зоне (ОШЗ) при сварке одно- и разнородных материалов. При этом большинство экспериментальных данных получено при использовании несимметричной плоскопараллельной схемы соударения (рис. 1, а). Вместе с тем, с учетом полученных в последнее время экспериментальных результатов, свидетельствующих об увеличении объема вовлекаемого в пластическое деформирование металла при сварке по схеме двустороннего симметричного плакирования (далее — батарейная схема) за счет повышения деформирующего импульса давления в зоне соударения [8, 9], значительный научный и практический интерес представляет изучение особенностей пластического течения металла ОШЗ при такой схеме сварки.

Целью настоящей работы явилось исследование закономерностей и особенностей пластического деформирования приграничных объемов металла в условиях сварки взрывом по батарейной схеме.

Для достижения поставленной цели были проведены серии сравнительных экспериментов по сварке взрывом двух- и трехслойных модельных алюминиевых образцов соответственно по традиционной плоскопараллельной и батарейной схемам (рис. 1) с построением по результатам каждого опыта эпюр остаточных сдвиговых пластических деформаций  $g_{\max}$ , фиксируемых в непод-

вижных пластинах. Для этого в последних выфрезеровывали специальные окна-колодцы, в которые помещали слоистую модельную вставку (рис. 1), выполненную из предварительно подпрессованной рулонированной алюминиевой фольги толщиной 0,025...0,03 мм. Были проведены две серии опытов — для плоскопараллельной (толщина слоев 4 + (2 + 16) мм) и батарейной 4 + (2...16) + 4 мм) схем сварки. Скорость контакта  $v_k$  для двух серий соответствовала 2400 м/с, скорость соударения  $v_c$  для первой серии — 220, для второй — 370 м/с. После сварки взрывом опытных образцов изготавливали микрошлифы зоны соединения, включающей слоистую вставку. Цифровую фотосъемку полированных и протравленных поверхностей микрошлифов проводили на микроскопе Carl Zeiss Axiovert 40,  $\times 200$ ). Для построения эпюр максимальных сдвиговых деформаций использовали специальную программу EWD 1.0 [2], позволяющую автоматизировать процесс построения зависимостей  $g_{\max} = f(v)$ .

Параметры сварки подбирали таким образом, чтобы остаточное давление продуктов детонации

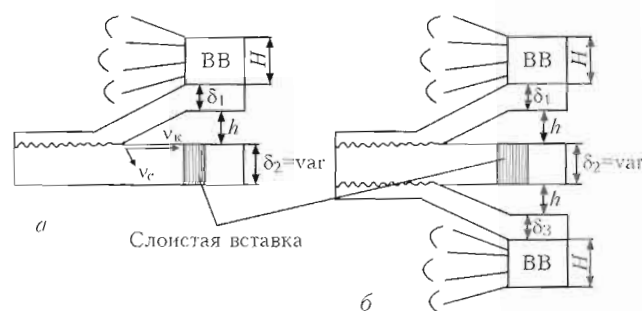


Рис. 1. Схема соударения слоев в двух- и трехслойных пакетах с использованием слоистых модельных вставок при сварке взрывом по плоскопараллельной (а) и батарейной (б) схемам (ВВ — взрывчатое вещество;  $H$  — высота заряда ВВ;  $\delta_1$ ,  $\delta_3$  и  $\delta_2$  — толщины соответственно-metaемых ( $\delta_1 = \delta_3$ ) и неподвижной пластины;  $h$  — сварочный зазор на границах пакета;  $v_k$ ,  $v_c$  — скорость соответственно контакта и соударения)

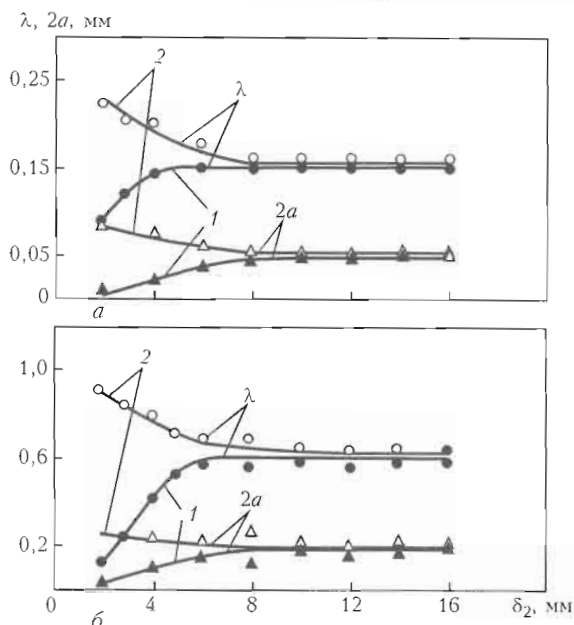


Рис. 2. Зависимость длины  $\lambda$  и амплитуды  $2a$  волн на границах двух- и трехслойного соединения алюминиевых пластин от толщины средней пластины  $\delta_2$ : а —  $v_c = 220$ ; б —  $370$  м/с; 1 — плоскопараллельная; 2 — батарейная схема

$P_{п.д}$  взрывчатого вещества было заведомо больше динамического предела текучести  $\sigma_T^d$  металла как в момент соударения пластин, так и по истечении некоторого времени, что обеспечивало при сварке двухслойных образцов приход в зону соединения волны разгрузки, в первую очередь, со стороны неподвижной пластины. Это условие выполнялось при малых значениях относительного сварочного зазора  $h/H$  порядка  $0,05 \dots 0,07$ .

Анализ конфигурации ОШЗ сваренных образцов, полученных по обеим схемам плакирования в двух сериях опытов, показал, что во всем диапазоне толщин неподвижной пластины линия соединения имеет волновой профиль. При этом, как было показано, например, в работе [9], при увеличении толщины неподвижной пластины  $\delta_2$  при сварке по плоскопараллельной и батарейной схемам характер изменения параметров волн в соединении различен (рис. 2, 3). При сварке двухслойных образцов размеры волн (длина  $\lambda$  и амплитуда  $2a$ ) сначала интенсивно возрастают, достигают при некотором значении  $\delta_2$  максимального

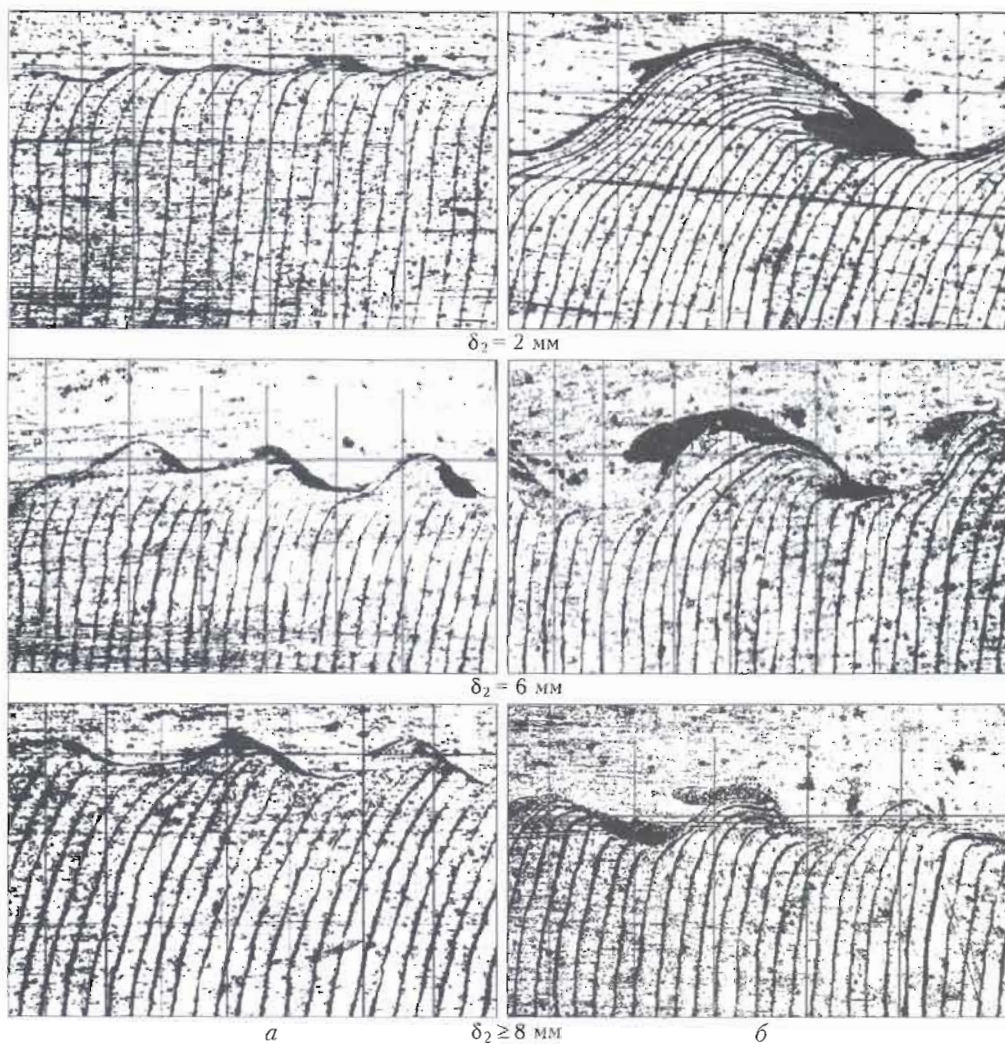


Рис. 3. Макроструктуры ( $\times 200$ ) модельных образцов из алюминия, полученных при сварке взрывом по плоскопараллельной (а) и батарейной (б) схемам при  $v_c = 220$  м/с

значения и практически не изменяются при дальнейшем увеличении толщины неподвижной пластины. При батарейной схеме наблюдается противоположная картина — уменьшение  $\lambda$  и  $2a$  при увеличении  $\delta_2$  [9].

Из анализа рис. 2 следует, что для выбранных условий сварки по батарейной схеме трехслойного пакета предельная толщина неподвижной пластины  $\delta_2^{пр}$ , начиная с которой параметры волн не изменяются и равны размерам волн в двухслойном соединении, полученная по плоскопараллельной схеме, для первой и второй серий составляют соответственно 8 и 10 мм. В обоих случаях при  $\delta \geq \delta_2^{пр}$  наиболее интенсивно сдвиговая пластическая деформация протекает в узкой околошовной зоне толщиной не более 0,15...0,3 мм. Значения максимальных сдвигов  $g_{max}$  в непосредственной близости от линии соединения составляют 100...120 и 130...150 % соответственно для первой и второй серии опытов.

При уменьшении толщины неподвижной пластины ( $\delta_2 < \delta_2^{пр}$ ) начинают проявляться качественные и количественные различия в пластическом деформировании металла ОШЗ в рассматриваемых схемах сварки (рис. 4).

Так, при уменьшении толщины  $\delta_2$  с 8 до 2 мм в двухслойных образцах, полученных по плоскопараллельной схеме, значение  $g_{max}$ , измеренное в непосредственной близости от линии соединения, снижается примерно вдвое и составляет примерно 50 и 75 % соответственно при  $v_c = 220$  и 370 м/с (рис. 4, 5). При батарейной схеме  $g_{max}$  приконтактных слоев, наоборот, увеличивается,

достигая значений примерно 180 и 250 % соответственно для первой и второй серий опытов (рис. 4, 5). Объяснить обнаруженный факт изменения уровня максимальных сдвиговых деформаций в приконтактных слоях двух- и трехслойных образцов, сваренных соответственно по плоскопараллельной и батарейной схемам, при варьировании толщины неподвижной пластины можно с позиции деформирующего импульса давления  $I_d$  как интегрального параметра, учитывающего давление в зоне соударения и время его действия [9, 10].

Рассмотрим сначала ситуацию, реализующуюся при изменении толщины неподвижной пластины при сварке двухслойной композиции. Как было показано ранее, с увеличением толщины неподвижной пластины  $\delta_2$  сдвиговая пластическая деформация приконтактных слоев металла (подобно изменению параметров волн в двухслойном соединении) сначала возрастает до максимума, затем, начиная с некоторого значения  $\delta_2$ , остается постоянной при неограниченном увеличении толщины неподвижной пластины (рис. 5, кривые 1). Значение деформирующего импульса давления  $I_d$  можно в соответствии с работами [9, 10] оценить по формулам в зависимости от соотношения времени прихода волны разгрузки со свободной поверхности неподвижной пластины  $\tau_p$  и времени деформирования металла ОШЗ за точкой контакта  $\tau_c$  (рис. 6):

при  $\tau_p < \tau_c$

$$I_d = \int_0^{\tau_p} p_{max} e^{-\tau/\theta} d\tau = p_{max} \theta (1 - e^{-\tau_p/\theta}), \quad (1)$$

при  $\tau_p > \tau_c$

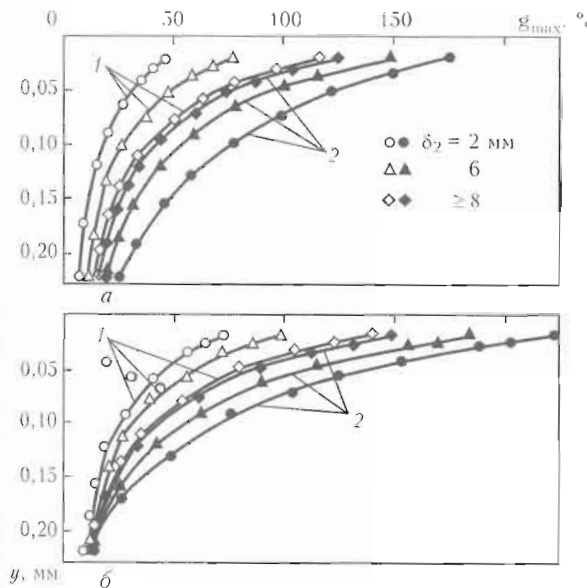


Рис. 4. Эпюры сдвиговых пластических деформаций, полученные на образцах, сваренных по плоскопараллельной (1) и батарейной (2) схемам сварки ( $v_c = 2400$  м/с): а —  $v_c = 220$ ; б — 370 м/с

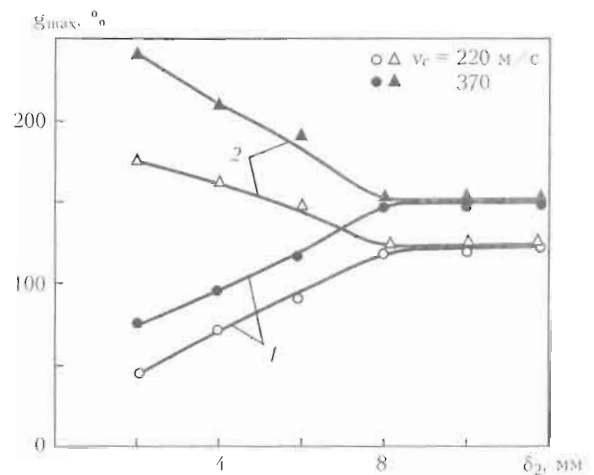


Рис. 5. Зависимость сдвиговой пластической деформации металла  $g_{max}$  в приконтактных слоях двух- (1) и трехслойных (2) образцов, сваренных взрывом, от толщины неподвижной пластины  $\delta_2$

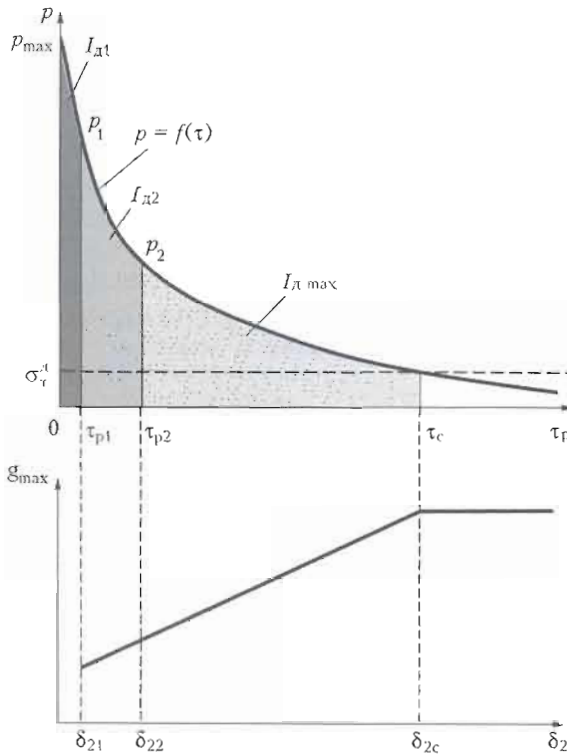


Рис. 6. Увеличение уровня сдвиговой пластической деформации в зоне соединения  $g_{max}$  при изменении деформирующего импульса  $I_d$  за счет времени действия давления  $\tau$

$$I_d = \int_{\tau_0}^{\tau_c} p_{max} e^{-\tau/\theta} d\tau = p_{max} \theta (1 - e^{-\tau_c/\theta}), \quad (2)$$

где  $p_{max}$  — максимальное (пиковое) давление в импульсе, определяемое скоростью соударения;  $\theta$  — постоянная времени, зависящая от свойств свариваемых материалов.

При малых толщинах неподвижной пластины ( $\delta_{21}$  на рис. 6) время прихода волны разгрузки со стороны свободной поверхности нижней пластины равно  $\tau_{p1} = 2\delta_{21}/c_0$  ( $c_0$  — скорость звука в металле), давление в зоне соединения за это время изменится с  $p_{max}$  до  $p_1$ , а значение импульса  $I_{d1}$ , рассчитанное по формуле (1), соответствует в этом случае площади, ограниченной фигурой  $0-p_{max}-p_1-\tau_{p1}$  (рис. 6). Приход волны разгрузки не дает в полной мере развиться деформационным процессам в приконтактных объемах металла за точкой контакта (в зоне соединения наблюдается «застывшая» картина пластического течения металла с соответствующим уровнем сдвиговых деформаций).

Увеличение  $\delta_{21}$  до значения  $\delta_{22}$  (рис. 6) или, что то же самое,  $\tau_{p1}$  до  $\tau_{p2}$  ведет к соответствующему возрастанию  $I_d$  с вовлечением в пластическую деформацию больших объемов металла и реализацией значительных сдвиговых деформаций приконтактных объемов металла. При снижении  $p$  до значения динамического предела те-

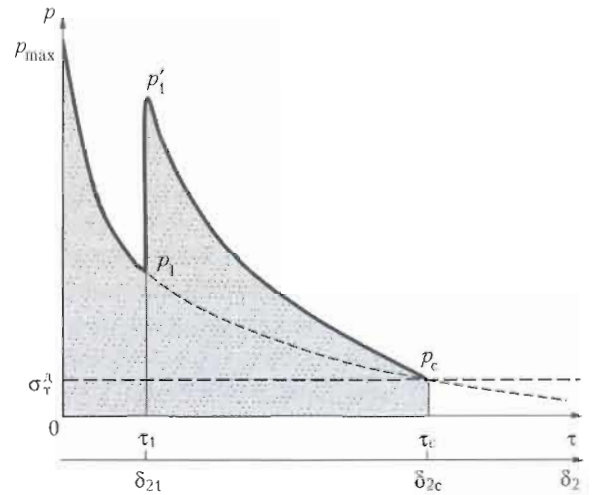


Рис. 7. Изменение давления в зоне соединения при сварке взрывом по батарейной схеме (толщина неподвижной пластины  $\delta_{21}$ )

кучести металла  $\sigma_T^d$ , что соответствует времени  $\tau_c$  на рис. 6, деформационные процессы в ОЩЗ протекают в полном объеме (для данных условий соударения), а степень пластической деформации  $g_{max}$  достигает своего максимально возможного значения, которое не изменяется при неограниченном увеличении  $\delta_2$ .

Совершенно иные деформационно-временные условия реализуются в зоне соединения при сварке по батарейной схеме. Здесь при малых толщинах неподвижной пластины  $\delta_2$ , спустя время  $\tau_1 = \delta_{21}/c_0$ , импульс давления, возникающий при соударении на противоположной границе свариваемого пакета, начинает оказывать дополнительное силовое воздействие на приконтактные слои металла, пластически деформируемые импульсом давления, возникшим на рассматриваемой границе (рис. 7). При этом суммарный деформирующий импульс, соответствующий площади, ограниченной геометрической фигурой  $0-p_{max}-p_1-p_1'-p_c-\tau_c$  (рис. 7), оказывается значительно больше, чем деформирующий импульс, действующий на приконтактные слои металла при сварке двухслойного композита по плоскопараллельной схеме (рис. 6). Это вызывает, в свою очередь, существенное увеличение уровня пластических сдвиговых деформаций металла ОЩЗ.

Время прихода импульса давления с противоположной границы (в случае сварки по батарейной схеме) при увеличении  $\delta_2$  также возрастает, а суммарный импульс давления уменьшается. В предельном случае, при  $\delta_2 \geq \delta_2^{up}$ , импульс давления с противоположной границы приходит после завершения деформационных процессов на рассматриваемой границе композита ( $\tau > \tau_c$ ) и не способен дополнительно продеформировать разгруженный металл ОЩЗ.

Таким образом, экспериментально показано, что при сварке взрывом по батарейной и плоскопараллельной схемам деформационно-временные условия формирования соединения и пластического деформирования приконтактных слоев металла существенно различаются: при сварке по батарейной схеме значения максимальных сдвиговых деформаций  $\epsilon_{\max}$ , реализуемых вблизи линии соединения при  $\delta_2 < \delta_2^{пр}$ , в несколько раз превышают соответствующие значения, характерные для плоскопараллельной, что связано с дополнительным силовым воздействием импульса давления, возникшего при соударении на противоположной границе соединения.

Полученные результаты необходимо учитывать при проектировании технологических процессов сварки взрывом с применением схемы двустороннего симметричного плакирования, поскольку при чрезмерных сдвиговых деформациях в металле ОШЗ (при малых толщинах неподвижной пластины  $\delta_2$ ) в зоне соединения будут образовываться участки оплавленного металла и другие дефекты, отрицательно сказывающиеся на качестве полученного композиционного материала.

1. Седых В. С., Соннов А. П., Шморган В. Г. Исследование характера течения металла при высокоскоростном плакировании взрывом на слоистых моделях // Сварка взры-

вом и свойства сварных соединений // Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолгПИ, 1988. — С. 82–90.  
 2. 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.  
 3. Основные закономерности деформирования металла околошовной зоны при сварке взрывом алюминия / Е. А. Чугунов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. П. Пеев // Там же. — 2001. — № 3. — С. 39–44.  
 4. 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.  
 5. 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.  
 6. Гульбин В. Н., Кобелев А. Г. Пластическая деформация металлов при сварке взрывом // Свароч. пр-во. — 1998. — № 10. — С. 9–12, 55–56.  
 7. Кривенцов А. Н., Седых В. С. О роли пластической деформации металла в зоне соединения при сварке взрывом // Физика и химия обработки материалов. — 1969. — № 1. — С. 132–141.  
 8. Бондарь М. П., Оголихин В. М. О пластической деформации в зоне соединения при плакировании взрывом // Физика горения и взрыва. — 1985. — 21, № 2. — С. 147–157.  
 9. Кузьмин С. В., Чувичлов В. А., Лысак В. И. Временные условия формирования соединения при сварке взрывом // Перспективные материалы. — 2005. — № 1. — С. 85–91.  
 10. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Сварка взрывом. — М.: Машиностроение, 2005. — 344 с.

Results of analysis of the deformation-time conditions in formation of welded joints and plastic deformation of near-contact metal layers in explosion welding of metals using different collision schemes are presented.

Поступила в редакцию 26.11.2008



## МЕТАЛЛУРГИЯ 2008

16–19 сентября 2008

Донецк, Украина

**V Международная выставка машин, оборудования, технологий и продукции горно-металлургического комплекса**

**Организатор:**

Специализированный выставочный центр «ЭКСПОДОНБАСС»

Тел./факс: +38(062) 381 21 35, 381 24 41, 381 21 60

E-mail: yarosh@expodon.dn.ua, metal@expodon.dn.ua

<http://www.expodon.dn.ua>