

УДК 621.791.76: 621.7.044.2

В. А. Чувичилов, к-т техн. наук, С. В. Кузьмин, д-р техн. наук, В. И. Лысак, д-р техн. наук
**К ВОПРОСУ О ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МЕТАЛЛА ОШЗ ПРИ СВАРКЕ
 ВЗРЫВОМ ПО СХЕМЕ ДВУСТОРОННЕГО СИММЕТРИЧНОГО ПЛАКИРОВАНИЯ**

Волгоградский государственный технический университет, weld@vstu.ru

В работе приведены исследования влияния схемы сварки взрывом (плоскопараллельной и батарейной) на свойства полученных соединений. Изучены особенности пластического деформирования металла в приконтактных объемах двух- и трехслойных образцах при различных условиях взрывного нагружения.

The results of investigation of influence of an explosion welding scheme (plane-parallel or battery) on the properties of the obtained joints are shown in the paper. The peculiarities of plastic deformation of a metal in the contacting volumes of two- and three-layered pieces under the different circumstances of explosive loading were studied.

Ключевые слова: сварка взрывом, батарейная схема, пластическая деформация, импульс давления

Keywords: explosive welding, battery scheme, plastic deformation, pulse of pressure

Интенсивная совместная пластическая деформация металла соударяющихся пластин является одним из факторов, определяющих образование соединения при сварке взрывом. Исследования авторов работ [1...8 и др.] позволили выявить и обобщить основные закономерности пластического деформирования металла в околосшовной зоне (ОШЗ) при сварке одно- и разнородных материалов. При этом подавляющее большинство экспериментальных данных

получено при использовании несимметричной параллельной 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 величины деформирующего импульса давления в зоне

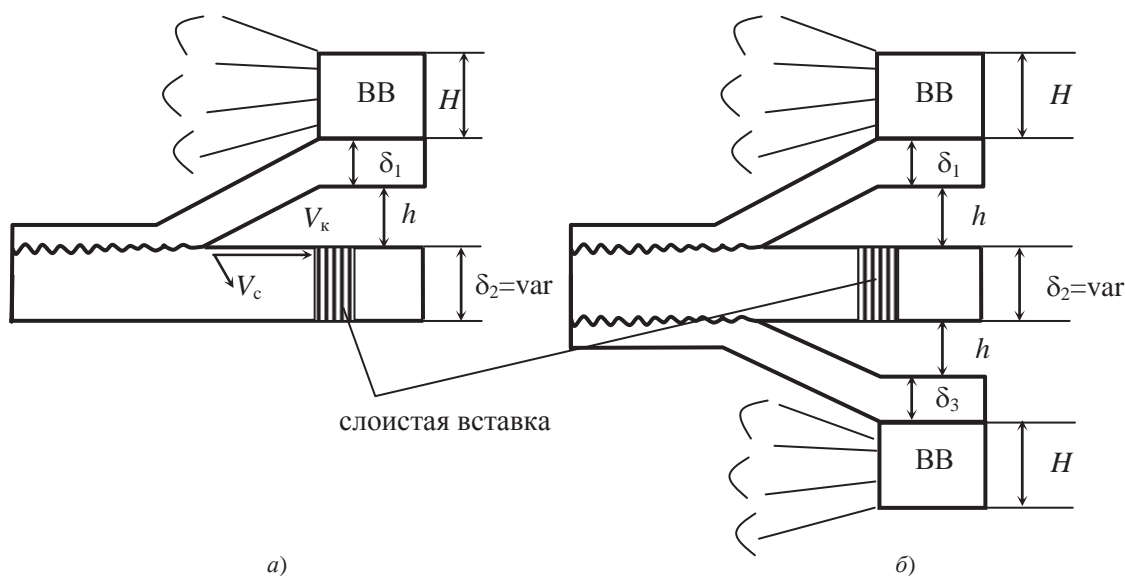


Рис. 1. Соударение слоев двух- и трехслойном пакетах с использованием слоистых модельных вставок при сварке взрывом по плоскопараллельной (а) и батарейной (б) схемам:
 ВВ – взрывчатое вещество; H – высота заряда ВВ; δ_1 , δ_3 , δ_2 – толщины соответственно метаемых и неподвижной пластин ($\delta_1 = \delta_3$); h – величина сварочного зазора на границах пакета

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 неподвижных пластинах. Для этого в последних выфрезеровывали специальные окна-колодцы, в которые помещали слоистую модельную вставку (см. рис. 1), выполненную из предварительно подпрессованной рулонированной алюминиевой фольги толщиной 0,025 ... 0,03 мм. После сварки взрывом опытных образцов на режимах, представленных в табл. 1, изготавливали микрошлифы зоны со-

единения, включающей слоистую вставку. С полированных и протравленных поверхностей микрошлифов производили цифровую фотосъемку на микроскопе Carl Zeiss Axiovert 40 при увеличении 200 крат.

Для построения эпюр максимальных сдвиговых деформаций использовали специальную программу EWD 1.0 [2], позволяющую автоматизировать процесс построения зависимостей $g_{\max} = f(y)$.

Параметры сварки подбирались таким образом, чтобы остаточное давление продуктов детонации $p_{\text{п.д}}$ ВВ было заведомо больше динамического предела текучести $\sigma_{\tau}^{\text{д}}$ металла как в момент соударения пластин, так и по истечении времени 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, порядка 0,05 ... 0,07, величинах относительного сварочного зазора h/H . Анализ конфигурации околошовной зоны сваренных образцов, полученных по обеим схемам плакирования в двух сериях опытов, показал, что во всем диапазоне

Таблица 1

Условия сварки взрывом модельных алюминиевых пластин

№ серии	Схема сварки	Толщины слоев, мм	Скорость соударения V_c , м/с	Скорость контакта V_k , м/с
1	Плоскопараллельная (см. рис. 1, а)	4 + (2 ... 16)	220	2400
	Батарейная (см. рис. 1, б)	4 + (2 ... 16) + 4		
2	Плоскопараллельная (см. рис. 1, а)	4 + (2 ... 16)	370	
	Батарейная (см. рис. 1, б)	4 + (2 ... 16) + 4		

толщин неподвижной пластины линия соединения имеет волновой профиль. При этом, как было показано, например, в [9], при увеличении толщины неподвижной пластины δ_2 при сварке по плоскопараллельной и батарейной схемам характер изменения параметров волн в соединении различен (рис. 2, 3). В первом случае (сварка двухслойных образцов) размеры волн (длина λ и амплитуда $2a$) сначала интенсивно растут, достигая при некотором значении δ_2 максимальной величины и практически не изменяясь при дальнейшем увеличении толщины неподвижной пластины. При батарейной схеме наблюдается противоположная картина – уменьшение λ и $2a$ при увеличении δ_2 . Под-

робное объяснение этого факта также дано в [9].

Из анализа рис. 2 следует, что для выбранных условий сварки по батарейной схеме трехслойного пакета предельная толщина неподвижной пластины δ_2^{np} , начиная с которой параметры волн не изменяются и равны размерам волн в двухслойном соединении, полученном по плоскопараллельной схеме, равна соответственно для первой и второй серий 8 и 10 мм. В обоих случаях при $\delta \geq \delta_2^{\text{np}}$ наиболее интенсивно сдвиговая пластическая деформация протекает в узкой околошовной зоне толщиной не более 0,15 ... 0,3 мм. Значения мак-

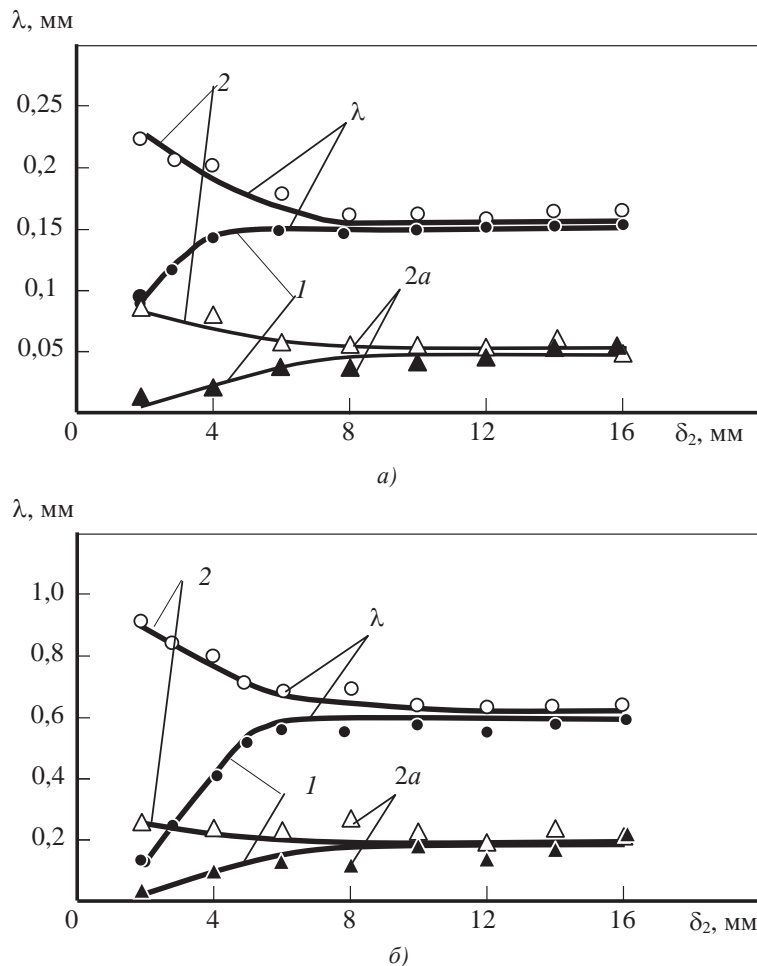


Рис. 2. Зависимость длины λ и амплитуды $2a$ волн на границах двух- и трехслойного соединения алюминиевых пластин от толщины средней пластины δ_2 : 1 – плоскопараллельная схема; 2 – схема с двусторонним симметричным плакированием (батарейная схема); а – $V_c = 220$ м/с; б – $V_c = 370$ м/с

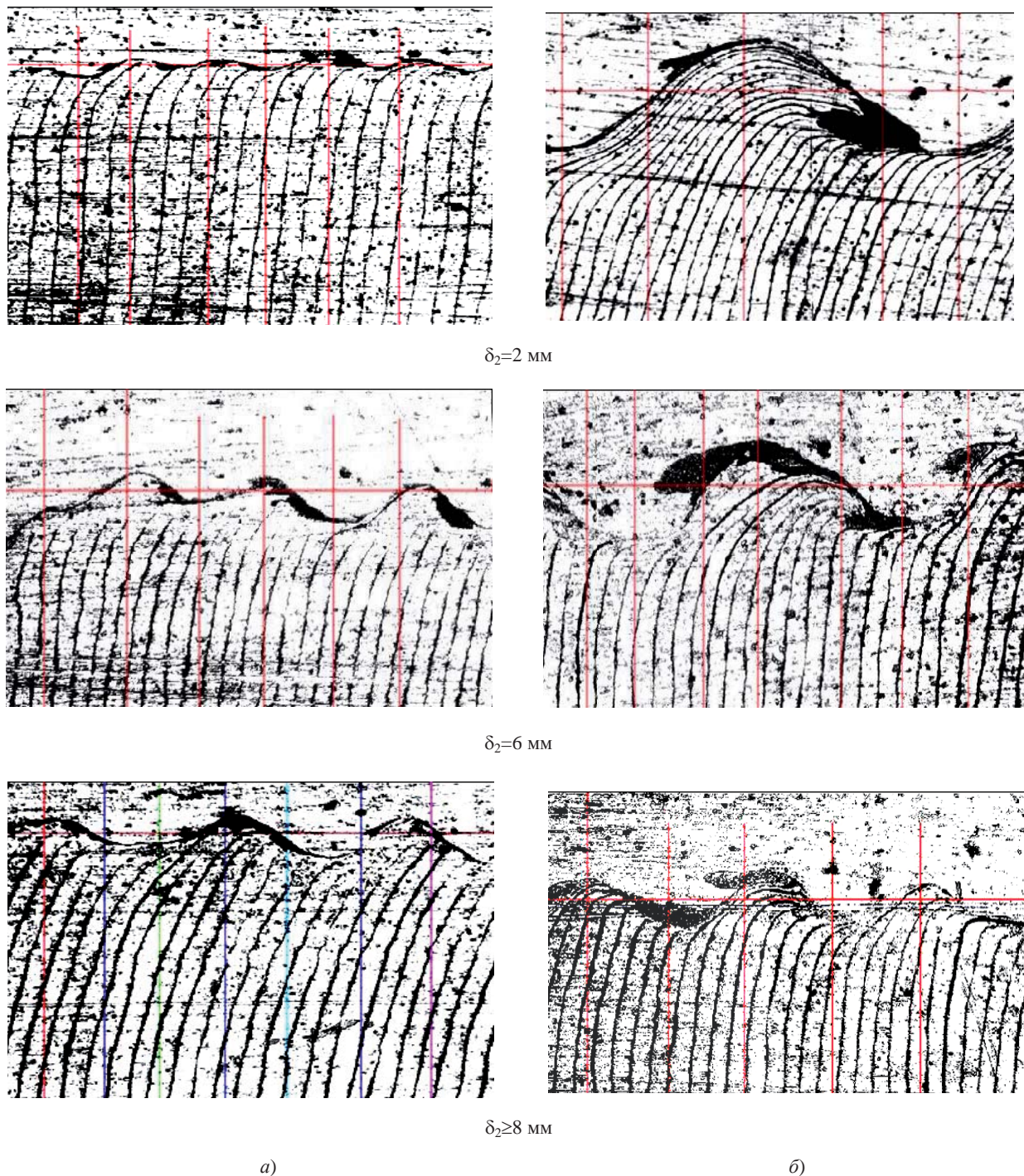


Рис. 3. Макроструктуры модельных образцов из алюминия, полученных при сварке взрывом по параллельной (а) и батарейной (б) схемам при $V_c=220$ м/с, $\times 200$

симальных 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 ($\delta_2 < \delta_2^{\text{нр}}$) начинают проявляться ка-

чественные и количественные различия в пластическом деформировании металла ОШЗ в рассматриваемых схемах сварки (рис. 4).

Так, при уменьшении толщины δ_2 с 8 до 2 мм в двухслойных образцах, полученных по плоскопараллельной схеме, величина g_{\max} , измеренная в непосредственной близости от ли-

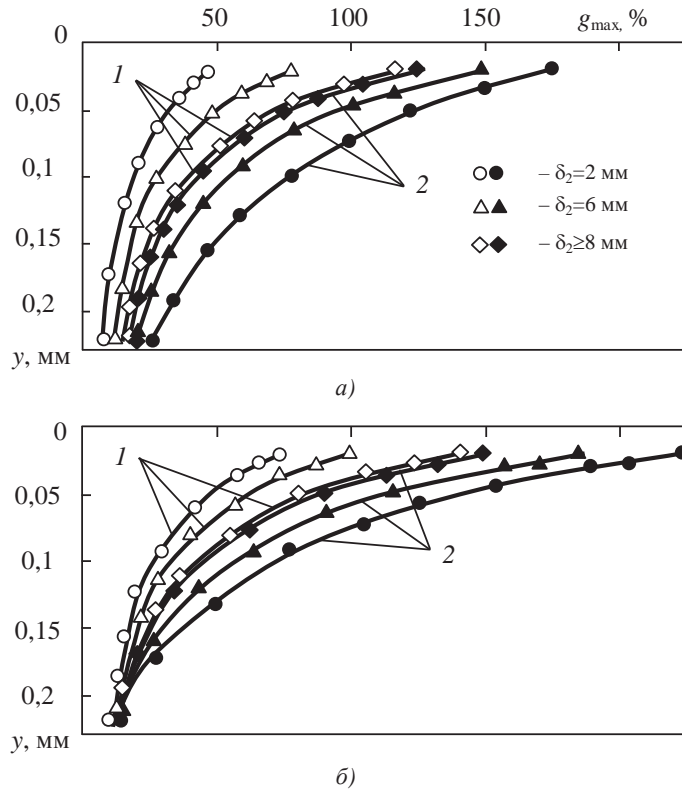


Рис. 4. Эпюры сдвиговых пластических деформаций, полученные на образцах, сваренных по плоскопараллельной (1) и батарейной (2) схем сварки ($V_k = 2400$ м/с):
 а – $V_c = 220$ м/с; б – $V_c = 370$ м/с

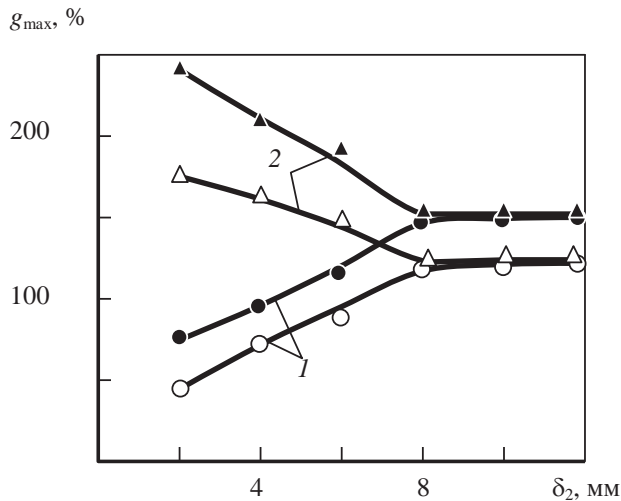


Рис. 5. Зависимость величины сдвиговой пластической деформации металла g_{\max} в приконтактных слоях двух- (1) и трехслойных (2) сваренных взрывом образцов от толщины неподвижной пластины δ_2 :
 ○, △ – $V_c = 220$ м/с; ●, ▲ – $V_c = 370$ м/с

нии соединения, снижается примерно вдвое и составляет ~ 50 и 75 % при $V_c = 220$ и 370 м/с соответственно (см. рис. 4, 5), в то время как при батарейной схеме g_{\max} приконтактных слоев наоборот увеличивается, достигая значений ~ 180 и 250 % соответственно для первой и вто-

рой серий опытов (см. 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 величину давления в зоне соударения и время его действия [9, 10].

Рассмотрим сначала ситуацию, реализующуюся при изменении толщины неподвижной пластины в случае сварки двухслойной композиции. Как было показано ранее, с увеличением толщины неподвижной пластины δ_2 величина сдвиговой пластической деформации приконтактных слоев металла (подобно изменению

параметров волн в двухслойном соединении) сначала растет до максимума, затем, начиная с некоторого значения δ_2 , остается постоянной при неограниченном увеличении толщины неподвижной пластины (см. рис. 5, кривые 1). Величину деформирующего импульса давления I_d можно в соответствии с [9, 10] оценить по формулам в зависимости от соотношения времен τ_p (время прихода волны разгрузки со свободной поверхности неподвижной пластины) и τ_c (время деформирования металла ОШЗ за точкой контакта) (рис. 6):

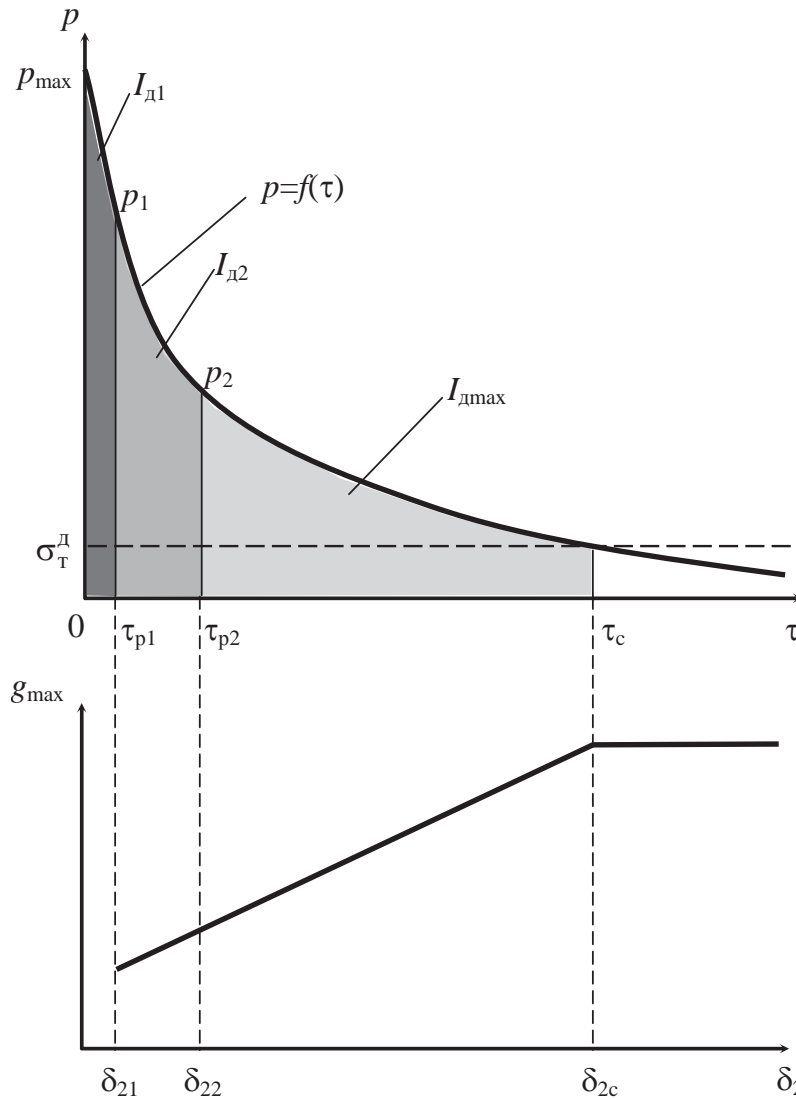


Рис. 6. Увеличение уровня сдвиговой пластической деформации в зоне соединения g_{max} при изменении величины деформирующего импульса I_d за счет времени действия давления τ

при $\tau_p < \tau_c$

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

при $\tau_p > \tau_c$

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

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

При малых толщинах неподвижной пластины (δ_{21} на рис. 6) время прихода волны разгрузки со стороны свободной поверхности нижней пластины равно $\tau_{p1} = 2\delta_{21}/c_0$ (где c_0 – скорость звука в металле), давление в зоне соединения за это время изменится с p_{\max} до p_1 , а величина импульса I_{d1} , рассчитанная по (1), соответствует в этом случае площади, ограниченной фигурой $0-p_{\max}-p_1-\tau_{p1}$ (см. рис. 6). Приход волны разгрузки не дает в полной мере развиваться дефор-

мационным процессам в приконтактных объемах металла за точкой контакта (в зоне соединения наблюдается «застывшая» картина пластического течения металла с соответствующим уровнем сдвиговых деформаций).

Увеличение δ_2 до значения δ_{22} (см. рис. 6) или, что то же самое, τ_p до τ_{p2} ведет к соответствующему росту I_d с вовлечением в пластическую деформацию больших объемов металла и реализацией значительных сдвиговых деформаций приконтактных объемов металла. Наконец, при снижении p до величины динамического предела текучести металла σ_T^d , что соответствует времени τ_c на рис. 6, деформационные процессы в ОШЗ 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 δ_2 .

Совершенно иные деформационно-

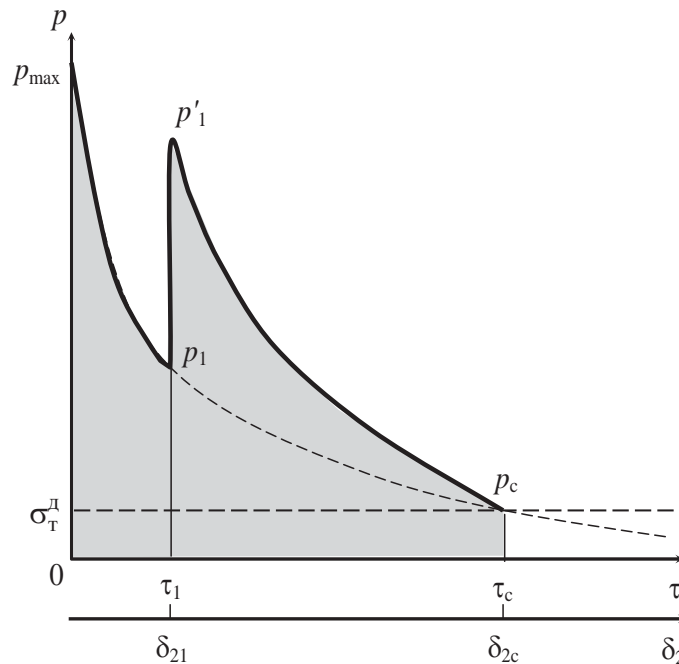


Рис. 7. Изменение давления в зоне соединения при сварке взрывом по батарейной схеме (толщина неподвижной пластины равна δ_{21})

временные условия реализуются в зоне соединения при сварке по батарейной схеме. Здесь при малых толщинах неподвижной пластины δ_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 соответствует площади, ограниченной геометрической фигурой (см. рис. 7) $0-p_{\max}-p_1-p'_1-p_c-\tau_c$, оказывается значительно больше, чем деформирующий импульс, воздействующий на приконтактные слои металла при сварке двухслойного композита по плоскопараллельной схеме (см. рис. 6). Это вызывает, в свою очередь, существенный рост уровня пластических сдвиговых деформаций металла ОШЗ.

Время прихода импульса давления с противоположной границы (в случае сварки по батарейной схеме) при увеличении δ_2 также увеличивается, а суммарный импульс давления, что очевидно, – уменьшается. В предельном случае, при $\delta_2 \geq \delta_2^{np}$, импульс давления с противоположной границы приходит после завершения деформационных процессов на рассматриваемой границе композита ($\tau > \tau_c$) и не способен дополнительно продеформировать разгруженный металл ОШЗ.

Выводы

1. Экспериментально показано, что при сварке взрывом по батарейной и плоскопараллельной схемам деформационно-временные условия формирования соединения и пластиче-

ского деформирования приконтактных слоев металла существенно различаются: при сварке по батарейной схеме значения максимальных сдвиговых деформаций g_{\max} , реализуемых вблизи линии соединения при $\delta_2 < \delta_2^{np}$, в несколько раз превышают соответствующие значения, характерные для плоскопараллельной, что связано с дополнительным силовым воздействием импульса давления, возникшего при соударении на противоположной границе соединения.

2. 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 δ_2) в зоне соединения будут образовываться участки оплавленного металла и другие дефекты, отрицательно сказывающиеся на качестве полученного композиционного материала.

Библиографический список

1. Седых, В. С. Исследование характера течения металла при высокоскоростном плакировании взрывом на слоистых моделях / В. С. Седых, А. П. Соннов, В. Г. Шморгун // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. трудов / ВолгПИ. – Волгоград, 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 // Физика и химия обработки материалов. – 2001. – №3. – С. 39-44.
4. 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.
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.