

В. А. Чувчилов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак

К ВОПРОСУ ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Волгоградский государственный технический университет

При всем многообразии технологических схем сварки взрывом [1...3] наибольшее распространение для изготовления трехслойных композиционных материалов плоской конфигурации получили батарейная (схема с одновременным двусторонним симметричным плакированием) (рис. 1) и так называемая плоскопараллельная схемы (рис. 2).

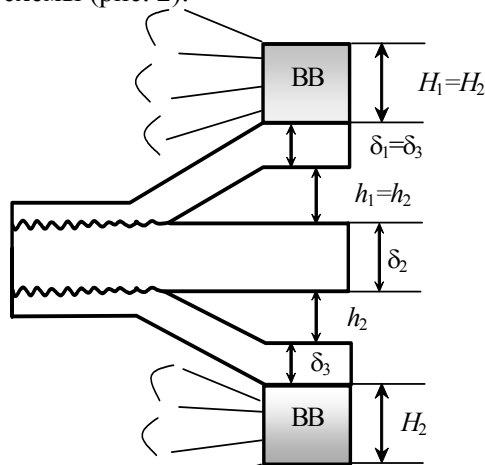


Рис. 1. «Батарейная» схема сварки взрывом плоских СКМ [2]

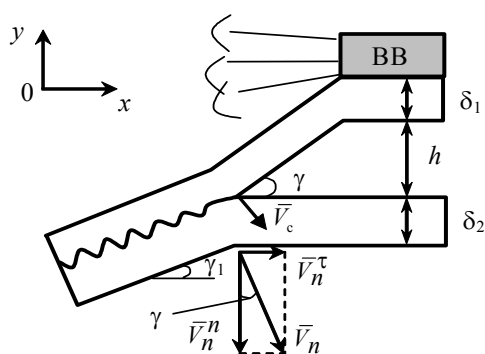


Рис. 2. Типичная картина соударения при плоскопараллельной сварке взрывом [1]

Несмотря на определенные преимущества батарейной схемы соударения, её применение ограничено рядом факторов, связанных, прежде всего, с тем, что до настоящего времени не раскрытым остаётся вопрос об энергетических условиях формирования соединения, представляющий как научный, так и практический интерес.

Целью настоящей работы явилось исследование энергетических условий формирования соединения при сварке металлов взрывом по батарейной и плоскопараллельной схемам соударения.

Формальный анализ энергетических условий образования соединения при различных схемах сварки взрывом (рис. 1, 2), но при одинаковых кинематических параметрах соударения, показывает, что в общем случае удельная кинетическая энергия метаемой пластины W при ее соударении с неподвижной расходуется по следующим статьям [4]:

$$W = W_1 + W_2 + W_3, \quad (1)$$

где W_1 – удельная остаточная кинетическая энергия системы сваренных пластин; W_2 – удельная энергия, затрачиваемая на пластическую деформацию металла; W_3 – удельная энергия, затрачиваемая на кумуляцию.

При этом W как для плоскопараллельной (индекс «п»), так и для батарейной (индекс «б») (в расчете на одну границу соединения) схем, определяется массой и скоростью метаемой пластины:

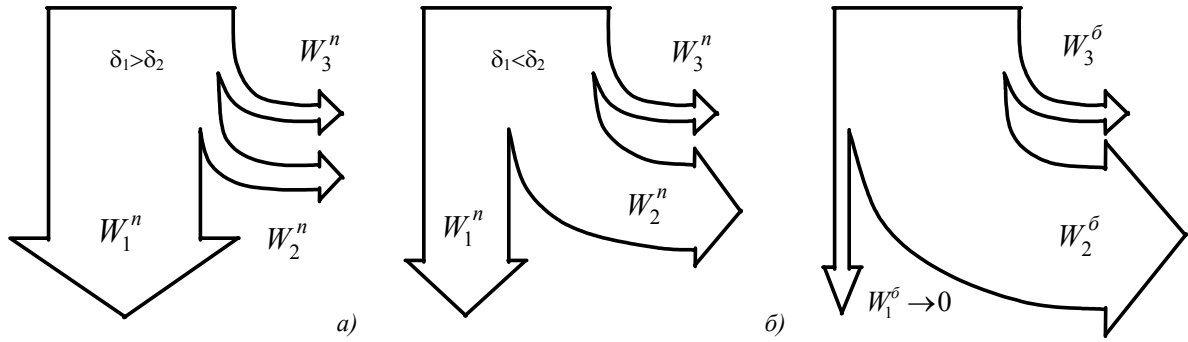


Рис. 3. Структура энергетических балансов при сварке взрывом по плоскопараллельной (а) и «батарейной» (б) схемам

$$W^n = W^\delta = \frac{m_1 V_c^2}{2} \quad (2)$$

Энергозатраты на пластическую деформацию металла W_2^n , определяющие, в конечном счете, свойства сварного соединения [5], рассчитываются согласно [4] как:

$$W_2^n = \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)} \frac{V_c^2}{2} \left[1 - (V_k / c_0)^2 \right] \quad (3)$$

$$W_3^n = W_3^\delta = \tilde{m} \frac{V_c^2}{2} \left(\frac{V_k}{c_0} \right)^2 \quad (4)$$

Из выражения (1) следует:

$$\begin{aligned} W_2^n &= W^n - W_1^n - W_3^n, \\ W_2^\delta &= W^\delta - W_1^\delta - W_3^\delta. \end{aligned} \quad (5)$$

Необходимо отметить, что в процессе сварки взрывом по плоскопараллельной схеме после соударения метаемой пластины с неподвижной двухслойный пакет имеет возможность продолжать движение со скоростью пакета \bar{V}_n , определяемой из закона сохранения количества движения

$\bar{V}_n = \frac{m_1 \cdot \bar{V}_c}{m_1 + m_2}$ [6]. При разложении результирующего вектора \bar{V}_n на нормальную и тангенциальную

составляющие \bar{V}_n^n и \bar{V}_n^t (рис. 2) имеем $\bar{V}_n^n = \bar{V}_n \cdot \cos \gamma_1$, $\bar{V}_n^t = \bar{V}_n \cdot \sin \gamma_1$. Учитывая, что в большинстве случаев сварки металлов взрывом угол соударения γ не превышает $10...12^\circ$, становится очевидным, что тангенциальная составляющая \bar{V}_n^t будет много меньше \bar{V}_n^n . Таким образом, пренебрегая \bar{V}_n^t в виду её малой величины (тем более, что $\gamma_1 \ll \gamma$), для случая плоскопараллельной схемы сварки взрывом можно записать [4]:

$$W_1^n \approx \frac{m_1^2 V_c^{n2}}{2(m_1 + m_2)} \quad (6)$$

При сварке по батарейной схеме соударение метаемых пластин с неподвижной происходит одновременно симметрично с двух сторон. В этом случае нормальные составляющие \bar{V}_{ci}^n векторов \bar{V}_{ci} с противоположных сторон направлены строго навстречу друг другу, тем самым «удерживая» трехслойный пакет от перемещения вдоль оси y , что неизбежно приведет к реализации $W_1^\delta \approx 0$.

Различия энергетических условий формирования соединения по плоскопараллельной и «батарейной» схемам можно проиллюстрировать рис. 3, анализ которого показывает, что в последнем случае (батарейная схема) вне зависимости от соотношения δ_1 и δ_2 энергия, затрачиваемая на пластическую деформацию (при одинаковых параметрах соударения), превышает W_2 для плоскопараллельной схемы (в большей мере при $\delta_1 > \delta_2$), что, в свою очередь, неизбежно должно приводить к увеличению параметров волнового профиля и количества оплавленного металла в зоне соединения, полученного по «батарейной» схеме.

Для экспериментальной оценки энергии W_2 , затрачиваемой на пластическое деформирование металла ОШЗ при сварке взрывом по обеим рассматриваемым схемам, применялся метод калориметрирования [8], т. к. по данным [7] до $90...95\%$ всей энергии, затрачиваемой на пластическую дефор-

мацию металла, выделяется в сварных образцах в виде тепла. Для определения количества тепла, введенного в образец в процессе сварки взрывом, воспользовались выражением [4]:

$$Q=A(T_K-T_0)+m_{об}c_{об}(T_K-T_B), \quad (7)$$

где Q - теплота, введенная в образец; A - водяной эквивалент калориметра, определяемый экспериментально (в наших опытах он составил 1,358 Дж/град); T_B , T_0 , T_K - температура соответственно образца до опыта, равная температуре окружающего воздуха, воды до и после опыта; $m_{об}$ - масса сваренного образца; $c_{об}$ - удельная теплоемкость образца.

В опытах, проводимых на одноименных алюминиевых пластинах (АД0), постоянными оставались параметры соударения $V_c=630$ м/с, $V_k=2700$ м/с. От опыта к опыту изменялась толщина неподвижной пластины δ_2 от 2 мм до 16 мм в обеих схемах соударения. В экспериментах взрывную и калориметрическую системы размещали отдельно друг от друга, при этом время переноса образца в калориметр не превышало 20 с, а температура воды, измеряемая ртутным термометром с точностью $0,1^\circ\text{C}$, не превышала 50°C .

На рис. 4. представлены экспериментальные зависимости $W_2=f(\delta_2)$ для батарейной и плоскопараллельной схем сварки, причем для удобства их анализа значения W_2 для батарейной схемы показаны в расчете на одну границу. Анализ полученных зависимостей $W_2=f(\delta_2)$ (рис. 4) показывает, что при относительно небольших толщинах δ_2 наблюдается существенное различие в численных значениях энергий $W_2^6/2$ и W_2^n , реализуемых соответственно при батарейной и плоскопараллельной схемах сварки.

Так, например, при толщине $\delta_2=2$ мм энергия $W_2^6/2$ превышает W_2^n более чем в 2 раза (см. рис. 4, кривые 1 и 2). С увеличением δ_2 мм разница в значениях энергий $W_2^6/2$ и W_2^n уменьшается за счет перераспределения W по статьям энергозатрат (рис. 3, а) (в случае плоскопараллельной схемы согласно зависимости (6) уменьшается составляющая W_1) и при $\delta_2 \geq 10$ мм значения энергий W_2 становятся примерно одинаковыми. То есть, начиная с определенной толщины $\delta_2 \geq \delta_{2кр}$ (рис. 4), значение которой, как отмечалось в [9], зависит от скорости соударения V_c , энергетические условия формирования соединения в рассматриваемых схемах сварки становятся одинаковыми.

Очевидно, что при толщинах $\delta_2 < \delta_{2кр}$ большие значения энергии W_2^6 , затрачиваемой на пластическое деформирование металла ОШЗ в случае батарейной схемы сварки, обусловлено согласно [9] увеличением деформирующего импульса давления I_d , интегрального параметра, учитывающего величину давления в зоне соударения и время его действия, который, будучи пропорциональным W_2 , дополнительно активизирует процессы пластического деформирования металла ОШЗ. При этом, чем меньше толщина δ_2 , тем больше значение деформирующего импульса давления I_d и тем интенсивнее развиваются процессы пластического деформирования металла ОШЗ.

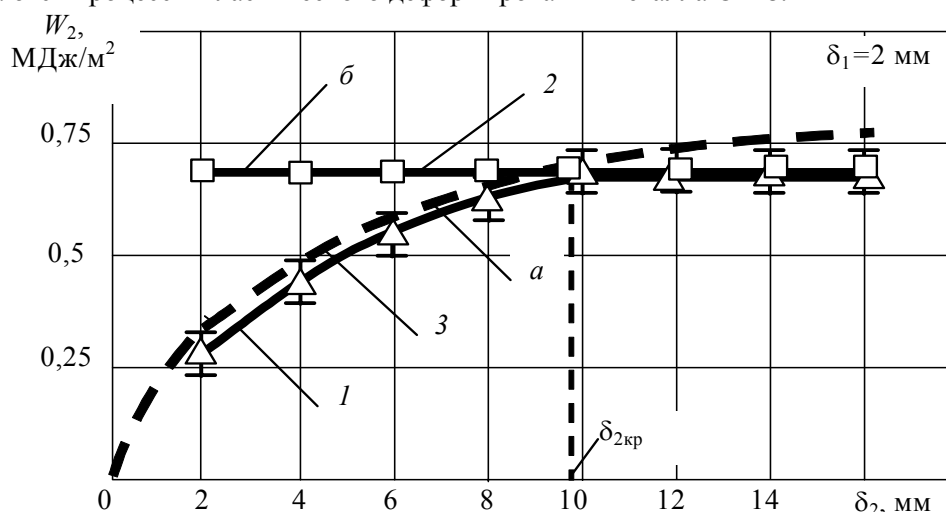


Рис. 4. Зависимость W_2 от толщины неподвижной пластины δ_2 , для случая сварки взрывом алюминиевых пластин ($V_c = 670$ м/с, $V_k = 2700$ м/с) по плоскопараллельной (а) и батарейной (б) схемам:

- 1 – экспериментальная кривая $W_2^n = f(\delta_2)$; 2 – экспериментальная кривая $W_2^6/2 = f(\delta_2)$;
3 – расчетная кривая $W_2^n = f(\delta_2)$

Итак, можно считать доказанным, что при $\delta_2 \geq \delta_{2кр}$ энергетические и деформационно-временные условия формирования соединения на обеих границах трехслойного соединения при сварке взрывом по батарейной схеме идентичны соответствующим условиям, реализуемым при плоскопараллельной схеме. Иначе дело обстоит при $\delta_2 \leq \delta_{2кр}$. В этом случае, как показывают полученные экспериментальные данные (рис. 4), энергия W_2^6 , затрачиваемая на пластическое деформирование металла ОШЗ при «батарейной» схеме, будет превышать $W_2^п$, обуславливая тем самым рост параметров волн и количества оплавленного металла (снижается прочность получаемого соединения, увеличивается переходное электросопротивление). То есть свойства соединения, полученного по батарейной схеме, будут отличаться от свойств соединения, полученного по традиционной схеме.

Чтобы обеспечить идентичные условия формирования соединения в обеих схемах сварки взрывом, необходимо в случае батарейной схемы снизить величину энергозатрат на каждой границе композита или, что то же самое, уменьшить величину деформирующего импульса на них. Это может быть достигнуто, по крайней мере, двумя путями.

Первый путь предусматривает возможность формирования соединения на каждой межслойной границе композита, получаемого по батарейной схеме, независимо друг от друга. Это требует увеличения толщины неподвижной пластины $\delta_2 > \delta_{кр}$, что далеко не всегда является приемлемым, поскольку величина δ_2 обычно строго лимитирована.

Второй путь снижения W_2 и I_d при батарейной схеме предполагает соответствующее изменение условий соударения металлических элементов с неподвижной пластиной (например, уменьшение скорости соударения V_c).

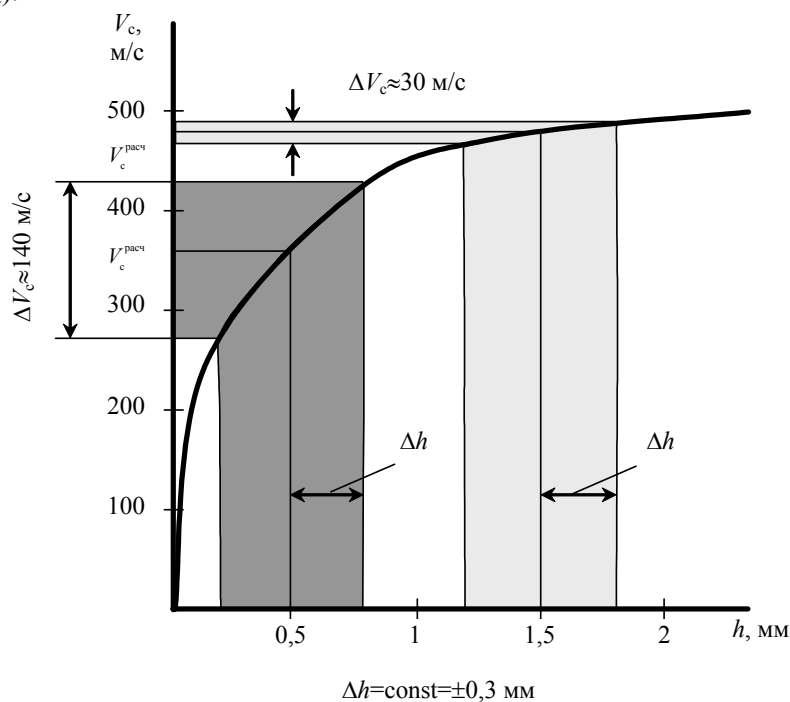


Рис. 5. Изменение скорости соударения $V_c^{расч}$ при варьировании величины технологического зазора h

Рассмотрим этот вариант на конкретном примере. При плакировании стального листа толщиной 2 мм слоем меди толщиной 1 мм оптимальная величина W_2 , обеспечивающая равнопрочность и бездефектность сварного шва, составляет $\sim 0,45 \dots 0,5$ МДж/м². При заданном сочетании толщин свариваемых материалов такой уровень энергозатрат на пластическую деформацию достигается при $V_c \approx 470$ м/с ($H_{6ЖВ} = 11$ мм; $h = 1,5$ мм). Если на этих же режимах попытаться получить трёхслойную композицию по батарейной схеме, то энергозатраты на каждой её границе составят $\sim 0,9$ МДж/м², что подтверждается результатами калориметрирования. Соответственно вырастут и параметры волнового профиля. Учитывая, что W_2 связана квадратичной зависимостью с V_c , последнюю необходимо уменьшить как минимум в $\sim 1,4$ раза, то есть до $330 \dots 340$ м/с.

Снижение V_c возможно, в свою очередь, также двумя способами:

- уменьшить высоту заряда ВВ Н при сохранении величины зазора h ;
- уменьшить h при сохранении Н.

Расчеты показали, что в первом варианте необходимо снизить высоту заряда Н до ~ 7 мм, яв-

ляющейся для аммонита 6ЖВ критической [10]; во втором - уменьшить h до 0,5...0,7 мм, что также не является приемлемым, так как при таких значениях h (фаза интенсивного разгона метаемой пластины, рис. 5) незначительное случайное его отклонение от расчётной величины в ту или иную сторону приведет к существенному изменению V_c (отклонение h всего $\pm 0,3$ мм влечет соответствующее изменение ($V_c^{\text{расч}} \approx \pm 70$ м/с), а также нарушению геометрии соударения, являющимся причиной фокусирования кумулятивной струи [11].

Все это вместе взятое может явиться причиной появления дефектов как внутреннего (локальные непровары, появление чрезмерного количества оплавов и т.п.), так и внешнего характера (прожоги, свищи).

Из вышесказанного следует, что при строго лимитированной толщине неподвижной пластины $\delta_2 < \delta_{2\text{кр}}$, ни один из рассмотренных путей уменьшения энергозатрат для случая батарейной схемы сварки взрывом не обеспечивает получение трёхслойного композита с заданными свойствами. При таких толщинах основного металла изготовление трехслойных композиционных материалов с симметричной двусторонней плакировкой осуществляется по традиционной плоскопараллельной схеме сварки взрывом, применение которой позволяет получать заданные свойства композитов.

Выводы

Экспериментально показано, что при сварке взрывом по батарейной и плоскопараллельной схемам энергетические условия формирования соединения металла существенно различаются, если толщина неподвижной пластины $\delta_2 < \delta_{2\text{кр}}$. Так при сварке взрывом одноименных алюминиевых пластин ($V_c = 630$ м/с, $V_k = 2700$ м/с) при толщине неподвижной пластины $\delta_2 = 2$ мм, энергия W_2^6 , затрачиваемая на пластическое деформирование металла ОШЗ, в случае батарейной схемы более чем в два раза превышает соответствующее значение $W_2^{\text{п}}$ для плоскопараллельной схемы. В этом случае для получения трехслойного композита с симметричной плакировкой наиболее предпочтительной является схема последовательного плакирования основного металла по традиционной плоскопараллельной схеме.

Установлено, что, начиная с определенной толщины неподвижной пластины $\delta_2 \geq \delta_{2\text{кр}}$, энергетические условия формирования соединения в рассматриваемых схемах сварки становятся одинаковыми. Следовательно, для изготовления трехслойных композиционных материалов экономически и технологически целесообразно применять батарейную схему плакирования.

В случае, когда имеется возможность увеличить толщину неподвижной пластины до значения $\delta_2 \geq \delta_{2\text{кр}}$, предусмотрев последующую прокатку композита до требуемой толщины, то в выборе технологической схемы изготовления трехслойных КМ предпочтение следует отдавать батарейной схеме сварки взрывом.

Библиографический список

1. Седых, В. С. Сварка взрывом и свойства сварных соединений / В. С. Седых, Н. Н. Казак – М.: Машиностроение, 1971. – 70 с.
2. Лысак, В. И. Классификация технологических схем сварки металлов взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин // Сварочное производство. – 2002. – №9. – С. 33-39.
3. Производство слоистых композиционных материалов / Кобелев А. Г., Лысак В.И., Чернышов В. Н. и др.-М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 426 с.
4. 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.
5. Седых, В. С. Классификация, оценка и связь основных параметров сварки взрывом // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. трудов / ВолгПИ. – Волгоград, 1985. – С. 3-30.
6. Александров, Е. В. Прикладная теория и расчеты ударных систем / Е. В. Александров, В. Б. Соколинский - М.: Наука, 1969. – 201 с.
7. Мак Лиин, Д. Механические свойства металлов. –М: Металлургия, 1965. – 431с.
8. Лабораторные работы по сварке / Под ред. Г. А. Николаева. 2-е изд, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1971. – 320 с.
9. Кузьмин, С. В. Временные условия формирования соединения при сварке взрывом / С. В. Кузьмин, В. А. Чувичилов, В. И. Лысак // Перспективные материалы. – 2005. – №1. – С. 85-91.
10. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин – М.: Машиностроение – 1, 2005. – 544 с.
11. Особенности процесса сварки взрывом в зонах технологического перегиба свариваемых элементов / Кривенцов А. Н., Седых В. С., Балувев А. В., Кузьмин В. И. // Сварочное производство. – 1998. – №2. – С. 6-10.