



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СВАРКИ ВЗРЫВОМ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

Рассмотрены энергетические условия формирования соединения слоистых композиционных материалов при сварке взрывом по батарейной и плоскопараллельной схемам соударения. Установлено, что, начиная с определенной толщины неподвижной пластины, экономически и технологически целесообразно применять батарейную схему плакирования.

Ключевые слова: сварка взрывом, композиционные материалы, плоскопараллельная и батарейная схемы сварки, энергетические условия, формирование соединения

При всем многообразии технологических схем сварки взрывом [1–3] наибольшее распространение при изготовлении трехслойных композиционных материалов плоской конфигурации получили батарейная (с одновременным двусторонним симметричным плакированием) (рис. 1) и плоскопараллельная (рис. 2) сварки взрывом.

Несмотря на определенные преимущества батарейной схемы сварки ее применение ограничено рядом факторов, связанных прежде всего с тем, что до настоящего времени не изученным является вопрос об энергетических условиях формирования соединения.

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 показал, что в общем случае удельная кинетическая энергия W метаемой пластины при ее соударении с неподвижной пластиной 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, W_3 — удельная энергия, затрачиваемая соответственно на пластическую деформацию металла и кумуляцию.

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

$$W^п = W^б = \frac{m_1 v_c^2}{2}. \quad (2)$$

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

$$W_2^п = \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)} \frac{v_c^2}{2} [1 - (v_k/c_0)^2], \quad (3)$$

$$W_3^п = W_3^б = \tilde{m} \frac{v_c^2}{2} \left(\frac{v_k}{c_0} \right)^2, \quad (4)$$

где $m_1 = \rho_1 \delta_1$ и $m_2 = \rho_2 \delta_2$ — соответственно удельная масса метаемой и неподвижной пластин; ρ_1

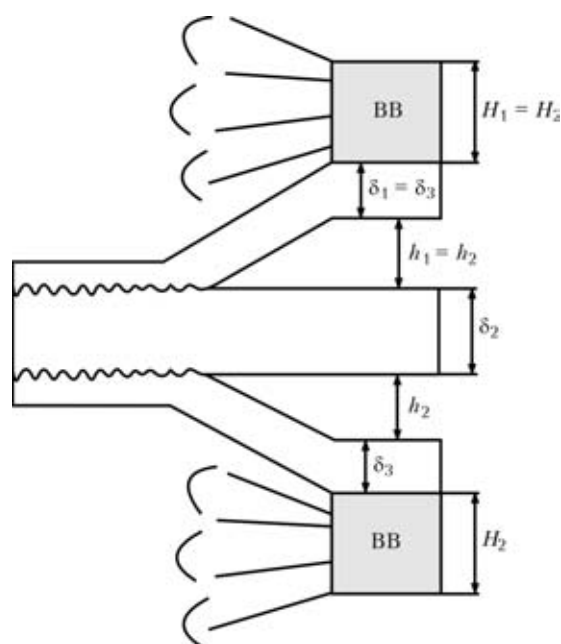


Рис. 1. Батарейная схема сварки взрывом плоских слоистых композиционных материалов [2]: BB — взрывчатое вещество; H_1, H_2 — высота заряда BB на первой и второй границах композита; δ_1, δ_3 — толщина метаемых пластин; δ_2 — толщина неподвижной пластины; h_1, h_2 — сварочный зазор соответственно на первой и второй границах композита

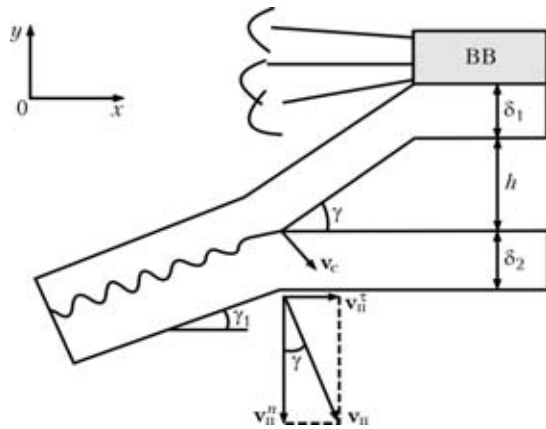


Рис. 2. Типичная картина соударения по плоскопараллельной схеме сварки взрывом [1]: v_n — результирующий вектор скорости движения двухслойного пакета; v_n^{τ} , v_n^n — нормальная и тангенциальная составляющие вектора скорости движения v_n ; v_c — вектор скорости соударения; γ — угол соударения; γ_1 — угол поворота пакета пластин

и ρ_2 — плотность свариваемых металлов; v_c — скорость соударения; v_k — скорость точки контакта; $\tilde{m} = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ — усредненная масса двух соударяющихся пластин; c_0 — скорость распространения звука в металле.

Из выражения (1) следует

$$W_2^n = W^n - W_1^n - W_3^n; \quad W_2^b = W^b - W_1^b - W_3^b. \quad (5)$$

Необходимо отметить, что в процессе сварки взрывом по плоскопараллельной схеме после соударения метаемой пластины с неподвижной двухслойный пакет может продолжать движение со скоростью пакета v_n , определяемой по закону сохранения количества движения $v_n = m_1 v_c / (m_1 + m_2)$ [6]. При разложении результирующего вектора v_n на нормальную и тангенциальную составляющие v_n^n и v_n^{τ} (рис. 2) получаем

$$v_n^n = v_n \cos \gamma_1; \quad v_n^{\tau} = v_n \sin \gamma_1.$$

Учитывая, что в большинстве случаев при сварке металла взрывом угол соударения γ не превышает 10...12°, становится очевидным, что тангенциальная составляющая v_n^{τ} будет много меньше v_n^n . Таким образом, пренебрегая v_n^{τ} ввиду ее малого значения (тем более, что $\gamma_1 \ll \gamma$), для случая плоскопараллельной схемы сварки взрывом можно записать [4]:

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

При сварке взрывом по батарейной схеме соударение метаемых пластин с неподвижной происходит одновременно и симметрично с двух сторон. В этом случае нормальные составляющие v_{ci}^n векторов v_{ci} с противоположных сторон нап-

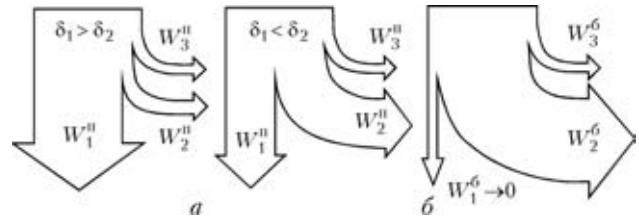


Рис. 3. Структура энергетических балансов при сварке взрывом по плоскопараллельной (а) и батарейной (б) схемам

равлены строго навстречу друг другу, тем самым они удерживают трехслойный пакет от перемещения вдоль оси y , что неизбежно приведет к реализации $W_1^b \approx 0$.

Различия энергетических условий формирования соединения по плоскопараллельной и батарейной схемам сварки взрывом иллюстрирует рис. 3. Из рисунка видно, 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 привести к увеличению параметров волнового профиля и массы оплавленного металла в зоне соединения, полученного сваркой взрывом по батарейной схеме.

Для экспериментальной оценки энергии W_2 , затрачиваемой на пластическое деформирование металла околошовной зоны (ОШЗ), при сварке взрывом по обеим рассматриваемым схемам применяли метод калориметрирования [8], поскольку, как следует из [7], до 90...95 % всей энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию металла, выделяется в сварных образцах в виде тепла. Чтобы определить, сколько тепла Q введено в образец в процессе сварки взрывом, воспользуемся выражением [4]:

$$Q = A(T_k - T_n) + m_{об} c_{об} (T_k - T_b), \quad (7)$$

где A — водяной эквивалент калориметра, определяемый экспериментально (в наших опытах он составил 1,358 Дж/град); T_b , T_n , T_k — температура соответственно образца до опыта, равная температуре окружающего воздуха, воды в начале и конце 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 толщину неподвижной пластины δ_2 изменяли от 2 до 16 мм при 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 тем-

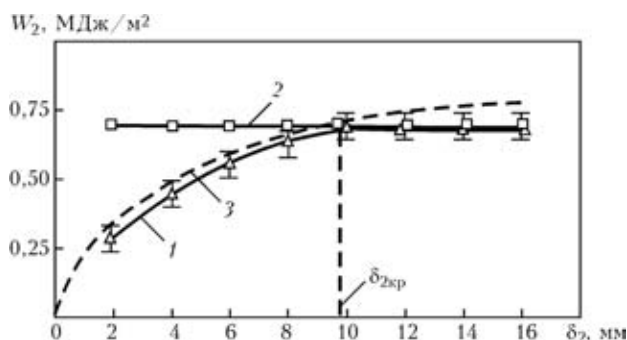


Рис. 4. Зависимость W_2 от толщины неподвижной пластины δ_2 при сварке взрывом алюминиевых пластин ($\delta_1 = 2$ мм, $v_c = 670$ м/с, $v_k = 2700$ м/с) по плоскопараллельной (Δ) и батарейной (\square) схемам сварки взрывом: 1, 2 — экспериментальные кривые соответственно $W_2^{\delta}/2 = f(\delta_2)$ и $W_2^{\Pi}/2 = f(\delta_2)$; 3 — расчетная кривая $W_2^{\Pi} = f(\delta_2)$

пература воды, измеряемая ртутным термометром с точностью 0,1 °С, составляла не более 50 °С.

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости $W_2 = f(\delta_2)$, полученные для батарейной и плоскопараллельной схем сварки, причем для удобства их анализа значения W_2 для батарейной схемы взяты из расчета на одну границу.

Анализ полученных зависимостей $W_2 = f(\delta_2)$ (рис. 4) свидетельствует о том, что при относительно небольшой толщине δ_2 имеет место существенное различие в численных значениях энергий $W_2^{\delta}/2$ и W_2^{Π} , реализуемых соответственно при батарейной и плоскопараллельной схемах сварки. Так, например, при $\delta_2 = 2$ мм значение $W_2^{\delta}/2$ превышает W_2^{Π} более чем в 2 раза (кривые 1 и 2 на рис. 4). С увеличением δ_2 разница в значениях энергий $W_2^{\delta}/2$ и W_2^{Π} уменьшается за счет перераспределения W по статьям энергозатрат (см. рис. 3, а) (при плоскопараллельной схеме согласно зависимости (б) составляющая W_1 уменьшается), а при $\delta_2 \geq 10$ мм значения W_2 становятся примерно одинаковыми, т. е., начиная с определенной толщины $\delta_2 \geq \delta_{2кр}$ ($\delta_{2кр}$ — критическая толщина неподвижной пластины), 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 $\delta_2 < \delta_{2кр}$ большие значения энергии W_2^{δ} , затрачиваемой на пластическое деформирование металла ОШЗ в случае батарейной схемы сварки, обусловлены согласно [9] увеличением деформирующего импульса давления I_d , интегрального параметра, учитывающего значения давления в зоне соударения и время его действия. Эта величина, будучи пропорциональной W_2 , дополнительно активизирует процессы пластического деформирования металла ОШЗ. При этом, чем меньше δ_2 , тем больше значение деформи-

рующего импульса давления I_d и тем интенсивнее развиваются процессы пластического деформирования металла ОШЗ.

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 условиям, реализуемым при плоскопараллельной схеме. Иначе дело обстоит при $\delta_2 \leq \delta_{2кр}$. В этом случае, как показали экспериментальные данные (рис. 4), энергия W_2^{δ} , затрачиваемая на пластическое деформирование металла ОШЗ при батарейной схеме, будет превышать W_2^{Π} , обуславливая тем самым рост параметров волн и количества оплавленного металла (снижается прочность получаемого соединения, увеличивается переходное электросопротивление), т. е. свойства соединения, полученного сваркой взрывом по батарейной схеме, будут отличаться от свойств соединения, полученного по традиционной схеме.

Чтобы обеспечить идентичные условия формирования соединения, полученного сваркой взрывом по обеим схемам, необходимо при использовании батарейной схемы снизить энерговыделение на каждой границе композита или уменьшить деформирующий импульс на них, что может быть достигнуто, по крайней мере, двумя путями. Первый — предусматривает возможность формирования соединения на каждой межслойной границе композита, полученного по батарейной схеме, не зависимо друг от друга. Это требует увеличения толщины неподвижной пластины $\delta_2 > \delta_{2кр}$, что далеко не всегда является приемлемым, поскольку значения δ_2 обычно строго лимитированы. Второй путь предполагает соответствующее изменение условий соударения металлических элементов с неподвижной пластиной (например, уменьшение скорости соударения v_c).

Рассмотрим этот вариант на конкретном примере. При плакировании стального листа толщиной 2 мм слоем меди толщиной 1 мм оптимальное значение W_2 , обеспечивающее равнопрочность и бездефектность сварного шва, составляет около 0,45...0,50 МДж/м². При заданном сочетании толщин свариваемых материалов такой уровень энергозатрат на пластическую деформацию достигается при $v_c \approx 470$ м/с (для аммонита БЖВ $H = 11$ мм; $h = 1,5$ мм). Если на этих же режимах попытаться получить трехслойную композицию по батарейной схеме, то энерговыделение W_2 на каждой из ее границ составит около 0,9 МДж/м², что подтверждается результатами калориметрирования. Соответственно возрастут и параметры волнового профиля. Учитывая, что W_2 связана квадратичной зависимостью с v_c , значения пос-



ледней необходимо уменьшить как минимум приблизительно 1,4 раза, т. е. до 330...340 м/с.

Снижение значений v_c возможно также двумя способами — уменьшением высоты заряда ВВ H при сохранении зазора h или уменьшением h при сохранении H .

Расчеты показали, что в первом варианте значения H необходимо снизить приблизительно до 7 мм, что для аммонита БЖВ является критическим [10]; во втором — уменьшить h до 0,5...0,7 мм, что также неприемлемо, поскольку при таких значениях h (фаза интенсивного разгона метаемой пластины) незначительное случайное его отклонение от расчетного в ту или иную сторону приводит к существенному изменению v_c (отклонение $h \pm 0,3$ мм влечет соответствующее изменение расчетной скорости соударения $v_c^{\text{расч}}$ приблизительно ± 70 м/с), а также к нарушению геометрии соударения, что является причиной фокусирования кумулятивной струи [11].

Все вместе взятое может вызвать появление дефектов как внутреннего (локальные непровары, чрезмерное количество оплавов и пр.), так и внешнего (прожоги, свищи) характера.

Таким образом, экспериментально доказано, 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 $W_2^{\text{б}}$, затрачиваемая на пластическое деформирование металла ОШЗ, в случае использования батарейной схемы сварки взрывом более чем в 2 раза превышает соответствующие значение $W_2^{\text{п}}$ при плоскопараллельной схеме. В этом случае для получения трехслойного композита с симметричной плакировкой предпочтительней схема последовательного плакирования ос-

новного металла по традиционной плоскопараллельной схеме. 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, если существует возможность увеличить толщину неподвижной пластины до $\delta_2 \geq \delta_{2\text{кр}}$, предусмотрев последующую прокатку композита до требуемой толщины, то при выборе технологической схемы изготовления трехслойных композиционных материалов предпочтение следует отдавать батарейной схеме сварки взрывом.

1. Седых В. С., Казак Н. Н. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. — М.: Машиностроение, 1971. — 70 с.
2. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Классификация технологических схем сварки металлов взрывом // Свароч. пр-во. — 2002. — № 9. — С. 33–39.
3. Производство слоистых композиционных материалов / А. Г. Кобелев, В. И. Лысак, В. Н. Чернышов и др. — М.: Интермет Инжиниринг, 2002. — 426 с.
4. Седых В. С., Соннов А. П. Расчет энергетического баланса процесса сварки взрывом // Физ. 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. тр. — Волгоград: Волг. политехн. ин-т, 1985. — С. 3–30.
6. Александров Е. В., Соколинский В. Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. — М.: Наука, 1969. — 201 с.
7. Мак Лин Д. Механические свойства металлов. — М.: Металлургия, 1965. — 431 с.
8. Лабораторные работы по сварке / Под ред. Г. А. Николаева. — М.: Высш. шк., 1971. — 320 с.
9. Кузьмин С. В., Чувичлов В. А., Лысак В. И. Временные условия формирования соединения при сварке взрывом // Перспектив. материалы. — 2005. — № 1. — С. 85–91.
10. Лысак В. И., Трыков Ю. П. Детонационные характеристики ВВ для обработки металлов. — Волгоград: Волг. политехн. ин-т, 1984. — 37 с.
11. Особенности процесса сварки взрывом в зонах технологического перегиба свариваемых элементов / А. Н. Кривенцов, В. С. Седых, А. В. Балуев, В. И. Кузьмин // Свароч. пр-во. — 1998. — № 2. — С. 6–10.

The paper analyzes the energy conditions of formation of a joint of lamellar composite materials in explosion welding by the stack and plane-parallel collision schematics. It is established that starting with a certain thickness of a stationary plate, application of the stack cladding schematic is rational in terms of cost and technology.

Поступила в редакцию 17.05.2006,
в окончательном варианте 13.07.2006