

ДЕФОРМАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕССА СВАРКИ ВЗРЫВОМ

В. И. ЛЫСАК, С. В. КУЗЬМИН, доктора техн. наук (Волгоград. гос. техн. ун-т, РФ)

Выполнен анализ деформационно-энергетических аспектов процесса сварки взрывом. Выявленная функциональная взаимосвязь между параметрами этого процесса в сочетании с разработанными математическими моделями дает возможность управлять энергетическими и температурно-временными условиями в зоне соединения и формированием требуемых структуры и свойств в получаемых композиционных материалах. Приведены примеры эффективного применения сварки взрывом.

Ключевые слова: сварка взрывом, слоистые композиционные материалы, пластическая деформация, энергетический баланс, управление процессом

Прогресс многих отраслей промышленности (и особенно таких науко- и материалоемких, как ракетно-космическая техника, энергетика, нефте- и газодобывающее и перерабатывающее машиностроение, электрометаллургия и др.) напрямую связан с широким внедрением новых материалов, сочетающих в себе высокие технико-эксплуатационные свойства, технологичность их изготовления и низкую себестоимость производства. Проблемы создания новых перспективных материалов, в частности, металлических слоистых композиционных материалов (СКМ) всегда относились к числу главных научно-технических приоритетов государства. Сварка взрывом в силу присущих ей особенностей является одним из эффективных путей создания высококачественных СКМ различных типов и назначения. Потребности промышленности в таких композитах интенсивно возрастают, что требует организации современного промышленного производства, ориентированного на выпуск широкого спектра композитов.

При сварке взрывом образование соединения происходит в результате деформационного воздействия на соединяемые материалы, характеризующегося высокой скоростью их соударения при незначительной продолжительности процесса, и вызывающего двухстадийную топохимическую реакцию, в результате протекания которой конечные свойства получаемых соединений определяются степенью, характером и временем деформации. Это позволяет рассматривать сварку взрывом как обычный управляемый процесс, являющийся для ряда конструкций и сочетаний материалов безальтернативным технологическим ре-

шением и позволяющим получать качественные соединения.

Значительные успехи в познании этого сложного процесса достигнуты благодаря исследованиям ряда российских и зарубежных ученых [1–9 и др.], теоретически и экспериментально выявившим основные закономерности исследуемого процесса, изучившим влияние основных параметров сварки на свойства получаемых соединений, построившим энергетический баланс сварки взрывом двух- и многослойных композиционных материалов, обобщившим граничные условия сварки взрывом и др.

Анализ природы образования сварного соединения металлов в твердой фазе, к числу которых относится сварка взрывом, показал, что высокоскоростные деформационные процессы, протекающие в металле околосшовной зоны (ОШЗ), играют решающую роль в образовании физического контакта, активации свариваемых поверхностей и в конечном счете схватывании металлов, что соответствует фундаментальным основам общей теории сварки давлением, сформированной в работах [10–13 и др.].

С помощью многочисленных теоретических и экспериментальных данных [14–17 и др.] доказано, что решающую роль в формировании сварного соединения играет пластическая сдвиговая деформация металла в ОШЗ, распределяющаяся экспоненциально по толщине свариваемых заготовок и достигающая вблизи линии соединения 100 % (рис. 1), а степень вовлечения в процесс деформирования металла ОШЗ существенным образом зависит от параметров сварки — скоростей контакта v_k и соударения v_c (рис. 1), а также от динамического угла соударения γ .

Обобщение большого количества экспериментальных данных показало, что пластическая сдвиговая деформация g_{max} в непосредственной близости от границы раздела слоев сваренного композита, а также толщина слоя пластически де-

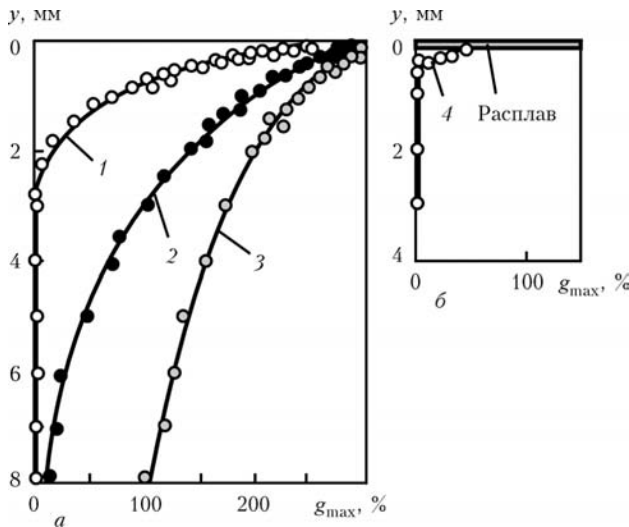


Рис. 1. Эпюры максимальных пластических сдвиговых деформаций g_{max} металла ОШЗ алюминиевых образцов, сваренных взрывом на дозвуковых (а) и околозвуковых (б) режимах [18]: 1 — $v_k = 1300$ м/с, $v_c = 200$ м/с; 2 — $v_k = 1300$ м/с, $v_c = 420$ м/с; 3 — $v_k = 1500$ м/с, $v_c = 700$ м/с; 4 — $v_k = 4700$ м/с, $v_c = 420$ м/с; y — расстояние от линии соединения слоев в свариваемом композите

формированного металла u_{def} прямо пропорциональны тангенциальной составляющей скорости соударения $v_c^T = v_c \sin \gamma$, которая зависит от соотношения скоростей соударения и точки контакта (рис. 2).

Установлено, что для ОШЗ соединений с волновым профилем (в отличие от безволновых соединений) характерна существенная неоднородность поля остаточной сдвиговой деформации не только по толщине сваренных элементов, но и в направлении вектора скорости точки контакта. Это проявляется в периодическом чередовании

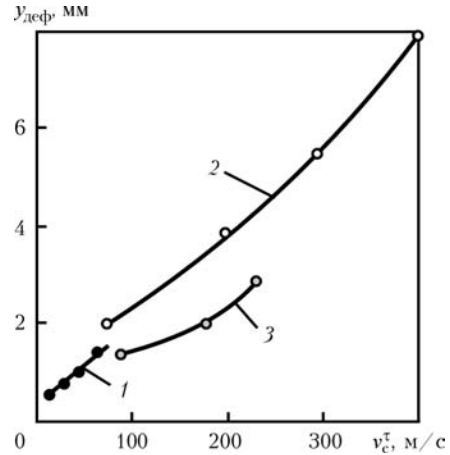


Рис. 2. Зависимость толщины деформированного слоя u_{def} от тангенциальной составляющей скорости соударения v_c^T [18]: 1 — медь; 2 — алюминий; 3 — сталь Ст3

зон металла с различным уровнем g_{max} (рис. 3). Указанная особенность пластического течения металла обусловлена формированием бугра деформации за счет не только поверхностных, но и глубинных слоев металла перед точкой контакта, что приводит к более интенсивному их деформированию под вершиной волны. В зонах, прилегающих к впадине, интенсивное пластическое течение металла затруднено [16, 18].

При сварке разнородных материалов характер пластического течения металла в ОШЗ соединения имеет некоторые особенности, связанные в первую очередь с различием их физико-механических свойств. При этом установлено, что степень локализации пластических сдвиговых деформаций в ОШЗ более прочной пластины существенно выше, чем в алюминиевой. Количественно это проявляется в различной толщине деформированных слоев разных металлов (рис. 4).

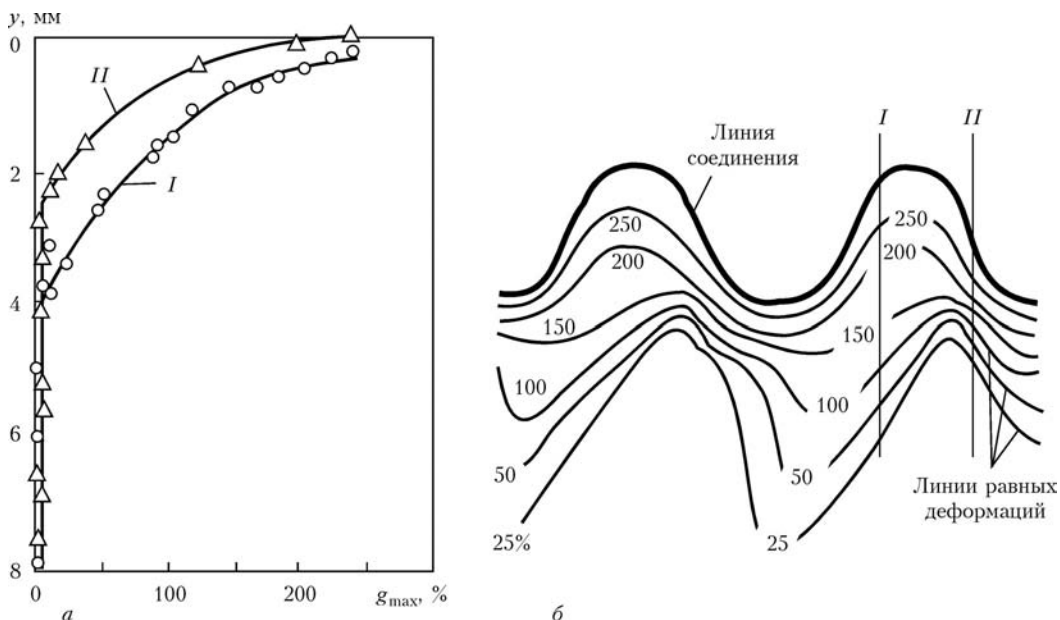


Рис. 3. Эпюры максимального сдвига (а) и линий равных деформаций (б) в соединении алюминиевых пластин с волновым профилем границы соединения [16, 18]: I, II — поперечные сечения волн

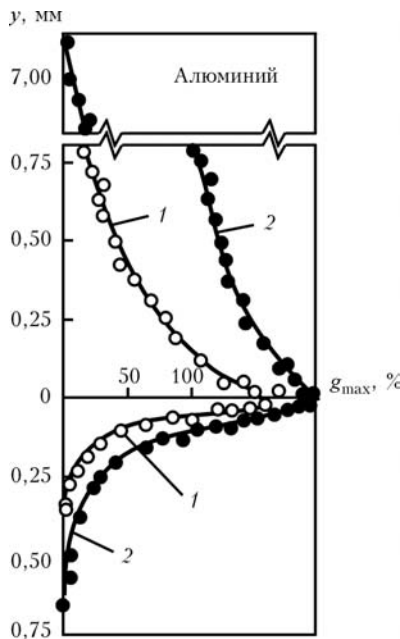


Рис. 4. Эпюры максимальных сдвигов в ОШЗ сваренных взрывом медно-алюминиевых композициях при $v_k = 1600$ м/с [17, 18]: 1 — $v_c = 200$; 2 — 350 м/с

Полученная обширная экспериментальная информация о характере изменения пластических деформаций по толщине свариваемых пластин позволила оценить условия формирования соединения одно- и разнородных металлов, а также расчетным путем построить начальные температурные поля для произвольного сечения сваренных биметаллических образцов из разнородных металлов. Учитывая пропорциональность выделившегося в некотором произвольном слое металла тепла элементарной работе деформирования, а также сделав допущение, что тепло во всех слоях выделяется одновременно, оценена тепловая ситуация в ОШЗ сваренных взрывом соединений раз-

нородных металлов, с построением начальных температурных полей (рис. 5). Проведенный анализ показывает, что сосредоточение пластической деформации в узкой ОШЗ более прочного материала свариваемой пары приводит к нагреву его приконтактных слоев до более высокой температуры и, как следствие, к возможному оплавлению (при интенсификации режимов соударения) преимущественно за счет этого тепла менее прочного и, как правило, менее тугоплавкого материала свариваемой пары.

Подобные явления наблюдаются и при сварке взрывом практически всех композиций из разнородных материалов с резко различающимися физико-механическими свойствами, например, алюминия со сталью, алюминия с титаном и др.

Важным научным результатом, полученным в результате экспериментальных исследований, проведенных в Волгоградском государственном техническом университете (ВолгГТУ), и позволившим взаимоувязать параметры процесса высокоскоростного соударения металлов и их исходные физико-механические свойства с прочностными характеристиками получаемых соединений, явилось построение энергетического баланса сварки взрывом двух- и многослойных металлических композиционных материалов с детальным описанием статей расхода энергии взрывчатого превращения и оценкой КПД процесса [19–21]. Определено, что энергетические параметры, определяя уровень и характер пластического течения, а следовательно, контролируя процессы активации и схватывания, позволяют на макроуровне управлять данным процессом. В укрупненном виде энергетический баланс системы соударяющихся пластин, связывающий параметры двух различных групп, выглядит следующим образом [19]:

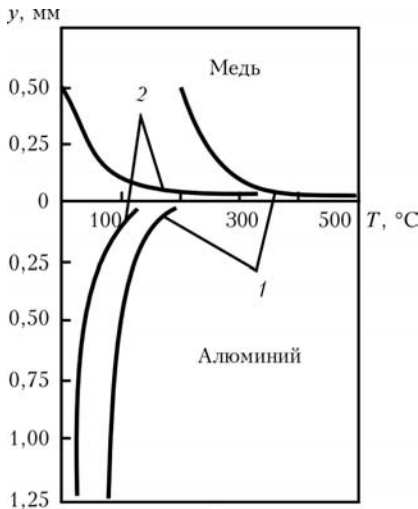


Рис. 5. Распределение температуры в сечении образца медно-алюминиевого композита, полученного сваркой взрывом [18]: 1 — $v_k = 2600$ м/с, $v_c = 350$ м/с; 2 — $v_k = 2000$ м/с, $v_c = 200$ м/с

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

$$W = \frac{m_1 v_c^2}{2}, \quad (2)$$

$$W_1 = \frac{m_1^2 v_c^2}{2(m_1 + m_2)}, \quad (3)$$

$$W_2 = \frac{\tilde{m} v_c}{2} \left[1 - \left(\frac{v_k}{c_0} \right)^2 \right]; \quad (4)$$

$$W_3 = \frac{\tilde{m} v_c}{2} \left(\frac{v_k}{c_0} \right)^2, \quad (5)$$

где W — удельная (отнесенная к единице площади) кинетическая энергия соударения свариваемых элементов; W_1 — удельная остаточная кинетическая энергия системы сваренных пластин; W_2, W_3 — удельная энергия, затрачиваемая со-

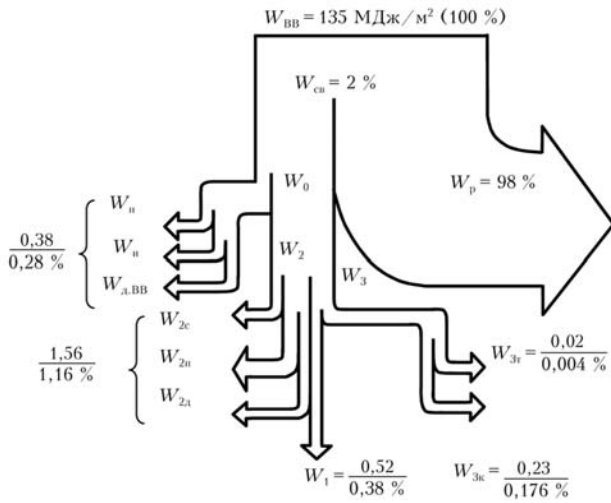


Рис. 6. Баланс энергии в системе двух соударяющихся стальных пластин (метаемая толщина 5 мм, неподвижная 18 мм) при $v_c = 350$ м/с, $v_k = 2$ км/с (в числителе даны значения в МДж/м²; в знаменателе — в % от энергии ВВ, принимаемой за 100 %)

ответственно на пластическую деформацию металла и на кумуляцию; $m = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ — усредненная масса свариваемых слоев, где m_1, m_2 — удельная масса соответственно метаемой пластины и неподвижной.

Проведя детальный постатейный анализ баланса энергии взрывчатого вещества (ВВ) в системе двух косоударяющихся пластин, авторы [21] представили его в полном виде (рис. 6):

$$W_{BB} = W_{св} + W_p = (W_n + W_i + W_{д.ВВ}) + W_1 + (W_{2с} + W_{2п} + W_{2д}) + (W_{3к} + W_{3т}) + W_p \quad (6)$$

где $W_{св}$ — потери энергии в сваренных пластинах; W_p — энергия разлета продукта детонации (ПД) ВВ; W_n, W_i — энергии нагрева метаемой пластины ПД, ее двойного пластического изгиба; $W_{д.ВВ}$ — диссипативные потери в ней от воздействия ПД; $W_{2с}, W_{2п}$ — энергия смятия микрорельефа соответствующих соударяющихся поверхностей и пластического течения в зоне соударения (сдвиг, волнообразование); диссипативные потери в ударной волне от соударения; $W_{3к}, W_{3т}$ — соответственно кинетическая и тепловая составляющие энергии кумулятивной струи.

Все вместе взятое дало возможность определить и описать все основные границы существования данного процесса в энергетических координатах усредненная масса свариваемых слоев \tilde{m} — относительная скорость точки контакта v_k/c_0 — динамический угол соударения γ (рис. 7).

На основании многочисленных экспериментальных данных доказано, что для каждого произвольного сочетания соединяемых металлов существует некоторое постоянное критическое значение энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию $W_{2кр}$, при котором в сварном соединении достигается равнопрочность, а ее значение может быть определено через показатель технологической деформируемости металла (рис. 8) [20]:

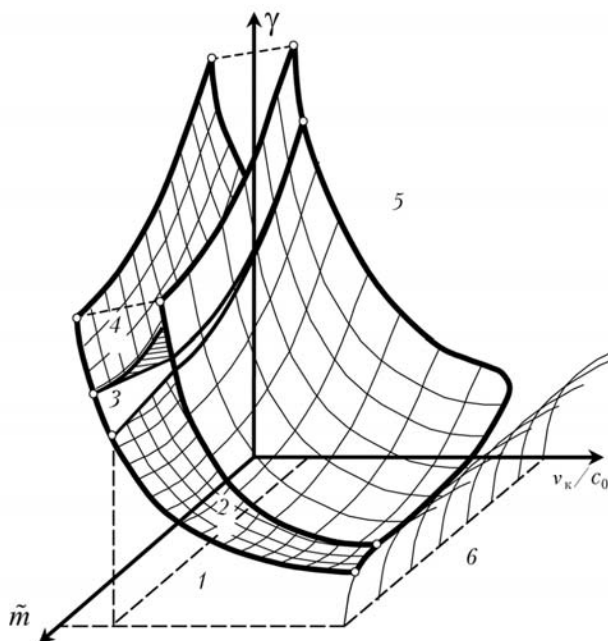


Рис. 7. Положение основных характерных областей сварки металла взрывом при различных режимах: 1 — докритический; 2 — «традиционный» режим с волнообразованием; 3 — безволновой; 4 — режим с аномальным волнообразованием; 5 — режим развитой кумуляции; 6 — режим сверхзвуковой

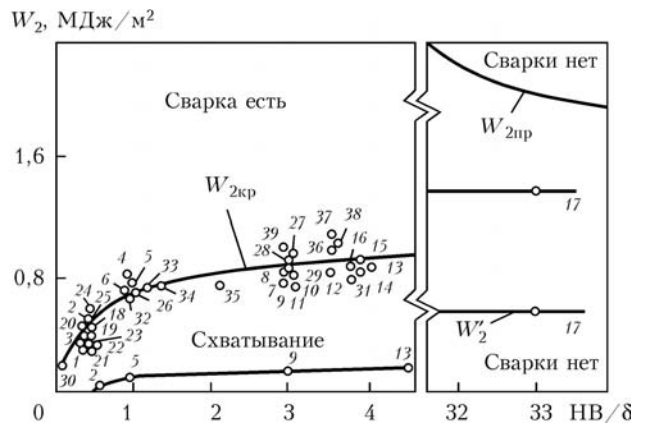


Рис. 8. Влияние показателя технологической деформируемости (критерия Астрова) HV/δ на критическую энергию пластической деформации $W_{2кр}$ (точки построены по данным различных исследователей): 1–3, 39 — Al+Al; 4–6 — Cu+Cu; 7–11, 39 — Ст3+Ст3; 12 — Ti+Ti; 13–16 — сталь 12X18H10T + сталь 12X18H10T; 17 — титан BT20 + титан BT20; 18–22 — алюминий АД1 + сталь 12X18H10T; 23 — алюминий АД1 + медь М1; 24 — Al + Ст3; 25 — алюминий АД1 + магний МА2-1; 26 — медь М1 + сталь 18H10T; 27, 28 — Ст3 + сталь 5ХВ2С, Ст3 + сталь 25ХНМА; 29 — сталь 18H10T + Ст3; 30 — Pb + Ст3; 31 — Zr + сталь 18H10T; 32–35 — сплавы алюминия + сталь 18H10T; 36, 37 — сталь Ст10 + сталь 18H10T; 38 — титан BT6 + сталь 10Г2СД; W'_2 — энергия, соответствующая началу схватывания металла

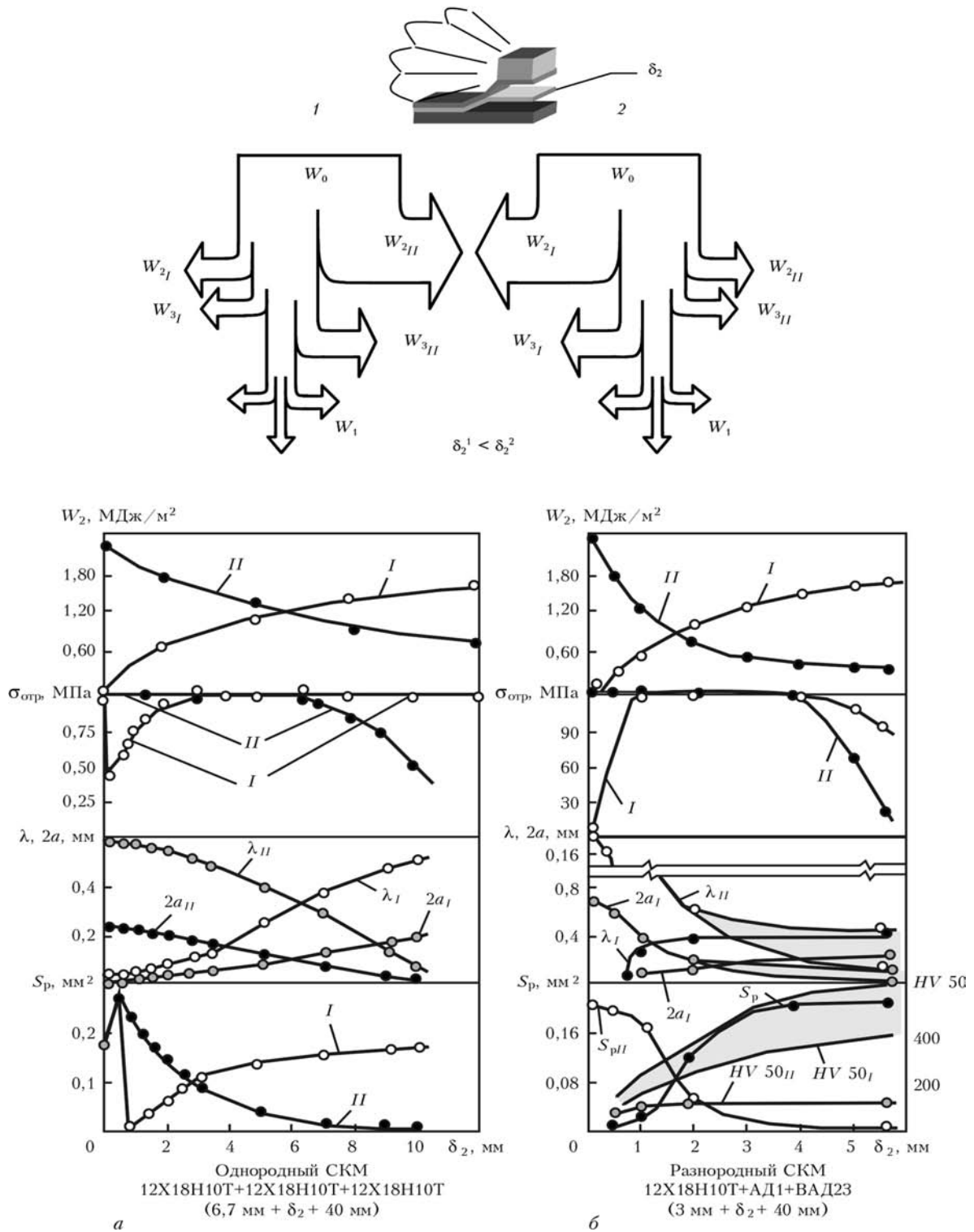


Рис. 9. Влияние толщины второго слоя δ_2 трехслойных стального (а) и сталеалюминиевого (б) композитов на распределение энергии W_2 между его границами (I и II), их прочность $\sigma_{отр}$, длину λ и размах $2a$ волн, площадь расплавленного металла S_p и его микротвердость HV_{50}

$$W_{2кр} = 0,606 + 0,184 \ln (HV/\delta) \text{ [МДж/м}^2\text{]}, \quad (7)$$

где HV/δ — соотношение твердости по Бринеллю к относительному удлинению.

Еще более сложен по характеру и крайне важен как в научном, так и практическом плане баланс

энергии в многослойной системе. Показано, что в зависимости от геометрии, параметров соударения, соотношения массовых характеристик слоев расход энергии в системе может претерпевать существенные изменения и протекать по-разному (рис. 9).

Это открывает пути к управлению процессом формирования качественных сварных соединений на любой границе композита. Так, например, в трехслойном композите применение тонких промежуточных слоев, как правило, обуславливает энергетический кризис первой границы из-за малой толщины слоев, что и определяет низкую здесь прочность. Подобная ситуация, но уже на второй границе реализуется при большой толщине промежуточного слоя.

Накопленный к настоящему времени обширный теоретический и экспериментальный материал неопровержимо свидетельствует о том, что в процессе высокоскоростного соударения металлических пластин, затрачиваемые на пластическую деформацию приконтактных объемов металла работа или энергия, обуславливающие в конечном итоге качество сварного соединения, определяются совокупностью давления (изменяющегося во времени) и времени, в течение которого оно способно пластически деформировать металл. Экспериментально установлено, что время формирования соединения τ_c (даже при сварке одной конкретной пары материалов) не является постоянным, а существенно зависит от скорости соударения v_c .

Для взаимоувязывания силового воздействия (давления) в зоне соударения и времени формирования соединения введен новый параметр — деформирующий импульс давления I_d , значения которого в основном можно регулировать либо путем варьирования толщины свариваемых пластин, влияющей на время, либо изменением пикового давления в зоне соединения за счет скорости соударения v_c согласно зависимости

$$I_d = \int_{\tau_0}^{\tau_c} p_{\max} e^{-\tau/\theta} d\tau = p_{\max} \theta (1 - e^{-\tau_c/\theta}), \quad (8)$$

где p_{\max} — максимальное (пиковое) давление в зоне контакта; τ_c — время действия давления, превышающего динамический предел текучести свариваемых материалов; θ — постоянная времени, зависящая от природы материалов, участвующих в соударении (для низкоуглеродистой стали $\theta = 0,96$ мкс, для алюминия $\theta = 0,565$ мкс).

С введением этого параметра появилась реальная возможность объяснить и количественно описать с новой точки зрения некоторые закономерности, проявляющие при сварке металлов взрывом, например, увеличение размера волн или прочности соединения при увеличении толщины свариваемых пластин или скорости соударения [18]. Кроме того, параметр I_d позволяет по-иному посмотреть на энергетику формирования соединения в условиях высокоскоростного соударения металлических пластин. Так давление p , действу-

ющее на приконтактные слои соединения в течение некоторого времени, совершает определенную работу по пластическому деформированию металла в них. При этом, чем выше уровень давления и продолжительней его действие, тем большая часть кинетической энергии метаемого элемента W затрачивается на пластическую деформацию металла ОШЗ (энергия W_2), определяя в конечном итоге энергетический баланс в системе. Однако в отличие от весьма важного параметра энергетической группы W_2 , который хоть формально и связан с условиями соударения и массовыми характеристиками (т. е. толщиной свариваемых элементов), но описывает лишь в обобщенном виде конечный результат высокоскоростного взаимодействия, значение деформирующего импульса I_d является «мостиком» к параметрам «микроуровня», поскольку связывает воедино давление в зоне контакта и время его действия с кинематикой и энергетикой процесса, с одной стороны, и пластическую деформацию с полнотой протекания активационных процессов в зоне контакта и прочностью соединения слоев, с другой.

Новые представления о деформационно-энергетических и температурно-временных условиях формирования соединения при сварке металлов взрывом, развиваемые в научной школе ВолГТУ, позволяют научно обоснованно подходить к проектированию технологических процессов изготовления металлических слоистых композиционных материалов различной конфигурации.

Физико-химические особенности процессов, протекающих при сварке взрывом, открыли уникальную возможность получения широкого круга композиционных материалов из практически любых разнородных металлов и сплавов с прочностью соединения слоев композита на уровне свойств основных металлов. С помощью этой технологии можно изготавливать слоистые композиты в виде листов, труб и других конструкций, армированные волокнами, дискретно-упрочненные, а также композиты с интерметаллическим упрочнением (рис. 10).

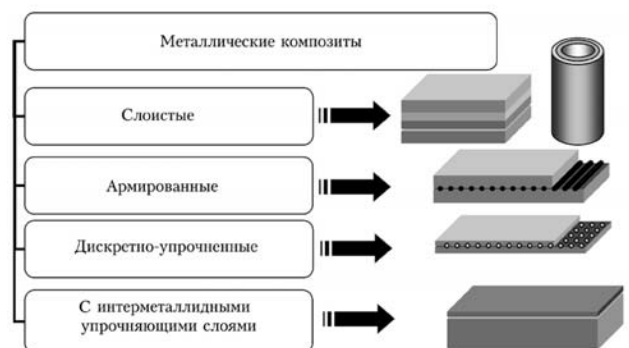


Рис. 10. Типы композиционных материалов, получаемых сваркой взрывом

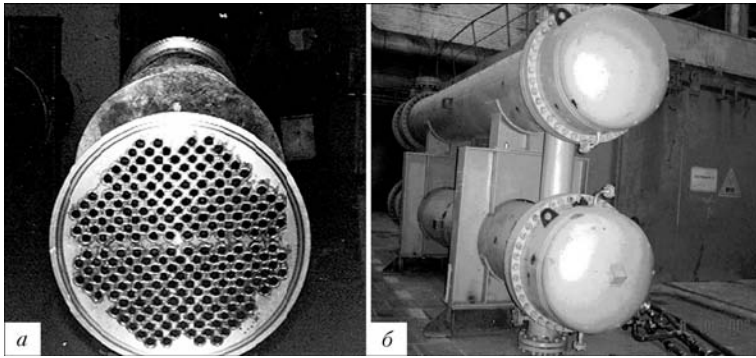


Рис. 11. Изготовленные с помощью сварки взрывом биметаллическая трубная решетка теплообменника АЭС «Ленинградская» (а) и биметаллический холодильник газоконденсатного оборудования (ОАО «Волгограднефтемаш», РФ) (б)

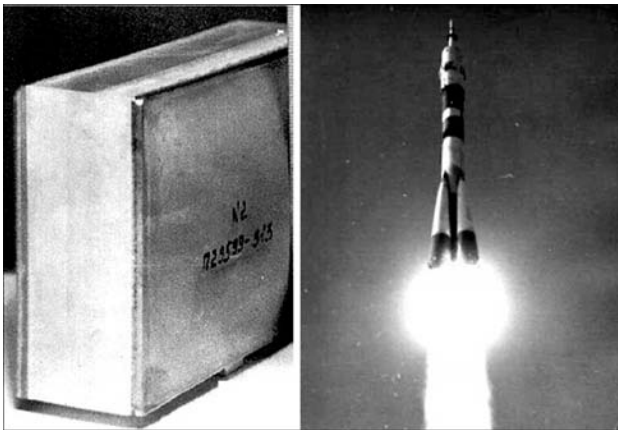


Рис. 12. Композиционный титано-алюминиевый корпус антенно-фидерного устройства космической техники, изготовленный сваркой взрывом



Рис. 13. Лопатки направляющего аппарата гидротурбины крупнейшей в Европе Волжской ГЭС с восстановленными сваркой взрывом шейками

На основе выполненных исследований для ряда российских и зарубежных организаций и предприятий разработан комплекс технологических процессов сварки взрывом. По заданиям Подольского машиностроительного завода им. С. Орджоникидзе, акционерных обществ «Каустик», ОАО «Волгограднефтемаш», «Норильский никель» и других организаций разработаны промышленные технологические процессы плакиро-

вания с помощью сварки взрывом крупногабаритных толстостенных заготовок корпусов и трубных решеток теплообменного и химического оборудования из сталей марок 22К, 16Г2С, 08Х18Н10Т латуныю ЛО62-1, титаном ВТ1-0, хастеллоем ХН65МВ, предназначенных для АЭС «Козлодуй» (Болгария), «Ловииза-2» (Финляндия), «Ленинградская» (РФ) и ряда других объектов (рис. 11).

Для предприятий оборонного и ракетно-космического комплекса разработан ряд эффективных решений, комплекс принципиально новых комбиниро-

ванных схем и технологических процессов изготовления титано-стальных, титано-магниевых, алюминивно-магниевых трубных переходных элементов различного назначения и конфигурации диаметром 12...1490 мм. Эти материалы применены в узлах космической техники в программах «Луноход», «Венера», «Марс», «Буран» и др. Создана технология получения композитных теплообменников с внутренними каналами и объемных несущих панелей из алюминиевых и титановых сплавов для космических объектов.

Разработаны также технологические процессы получения композиционных трех- и пятислойных титано-алюминиевых плит, предназначенных для корпусов приборов антенно-фидерных устройств космических аппаратов систем «Энергия», «Мир», «Морской старт», «Буран», МКС и др. (рис. 12). В настоящее время все российские космические системы оснащаются композитными узлами, изготовленными по данной технологии.

Для подлежащей ремонту после сорока лет эксплуатации крупнейшей в Европе Волжской ГЭС создана и внедрена уникальная технология восстановления литых лопаток из стали 30Л направляющих аппаратов гидротурбин массой 4,5 т и длиной около 5 м каждая (22 турбины ГЭС имеют по 32 лопатки), путем прецизионного локального плакирования сталью 08Х18Н10Т толщиной 4 мм трех шеек на базе 200...400 мм (рис. 13).

Полученные с помощью сварки взрывом композиционные материалы нашли широкое применение в энергетике и электрометаллургии (переходные медно-алюминиевые и сталеалюминиевые узлы, служащие для надежного соединения разнородных участков силовых электроцепей), в железнодорожном транспорте (тяжелонагруженные подшипники скольжения с антифрикционным слоем), металлургии (биметаллические медно-стальные водоохлаждаемые желоба) и других отраслях российской индустрии.

Экономическая эффективность внедрения полученных сваркой взрывом композитов обуславливается как за счет экономии дорогостоящих и

дефицитных материалов, так и за счет придания изделиям новых служебных свойств (повышение износостойкости, снижение переходного электросопротивления и т. п.). В ряде случаев сварка взрывом является безальтернативным технологическим способом получения металлических композиционных материалов, композитных конструкций и узлов.

Выводы

1. Анализ накопленного к настоящему времени обширного теоретического и экспериментального материала свидетельствует о том, что сварка взрывом является высокоэнергетическим процессом, обеспечивающим твердофазное получение равнопрочных соединений одно- и разнородных металлов и сплавов. Выявленные функциональные взаимосвязи между параметрами исследуемого процесса и созданными математическими моделями дает возможность целенаправленно управлять деформационно-энергетическими и температурно-временными условиями в зоне соединения, обуславливая формирование требуемых структуры и свойств слоистых двух- и многослойных композиционных материалов.

2. Благодаря высокому уровню свойств сваренных взрывом композитов из разнородных материалов последние нашли широкое и эффективное применение в различных отраслях промышленности (нефтехимической, энергетической и ракетно-космическом машиностроении, энергетике, металлургии и др.), успешно конкурируя с аналогичной продукцией, полученной альтернативными способами (наплавкой, прокаткой, напылением и др.). В ряде случаев сварка взрывом является единственно возможным способом получения высококачественных металлических композиционных материалов, композитных конструкций и узлов.

1. *Седых В. С., Казак Н. Н.* Сварка взрывом и свойства сварных соединений. — М.: Машиностроение, 1971. — 70 с.
2. *Седых В. С.* Классификация, оценка и связь основных параметров сварки взрывом // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолгПИ, 1985. — С. 3–30.

3. *Деформация металлов взрывом / А. В. Крупин, В. Я. Соловьев, Н. И. Шефтель, А. Г. Кобелев.* — М.: Металлургия, 1976. — 416 с.
4. *Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д.* Сварка взрывом. — М.: Машиностроение, 1987. — 216 с.
5. *Кудинов В. М., Коротеев А. Я.* Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978. — 168 с.
6. *Плакирование стали взрывом / А. С. Гельман, А. Д. Чудновский, Б. Д. Цемахович, И. Л. Харина.* — М.: Машиностроение, 1978. — 191 с.
7. *Захаренко И. Д.* Сварка металлов взрывом. — Минск: Наука і техника, 1990. — 205 с.
8. *Кузьмин Г. Е., Пай В. В., Яковлев И. В.* Экспериментально-аналитические методы в задачах динамического нагружения материалов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. — 312 с.
9. *Дерибас А. А.* Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1980. — 220 с.
10. *Красулин Ю. Л.* Дислокации как активные центры в топочимических реакциях // Теоретическая и экспериментальная химия. — 1967. — Т. III, вып. 1. — С. 58–65.
11. *Рыкалин Н. Н., Шориоров М. Х., Красулин Ю. Л.* Физические и химические проблемы соединения разнородных материалов // Изв. АН СССР. Неорг. материалы. — 1965. — 1, № 1. — С. 29–36.
12. *Красулин Ю. Л., Шориоров М. Х.* О механизме образования соединения разнородных материалов в твердом состоянии // Физ. и химия обработки материалов. — 1967. — № 1. — С. 89–97.
13. *Шориоров М. Х., Каракозов Э. С., Мясников Ю. В.* Особенности взаимодействия между соединяемыми металлами под влиянием повышенной температуры и давления // Там же. — 1971. — № 6. — С. 68–74.
14. *Кривенцов А. Н., Седых В. С.* О роли пластической деформации металла в зоне соединения при сварке взрывом // Там же. — 1969. — № 1. — С. 132–141.
15. *Бондарь М. П., Оголихин В. М.* О пластической деформации в зоне соединения при плакировании взрывом // Физ. горения и взрыва. — 1985. — 21, № 2. — С. 147–157.
16. *Основные закономерности деформирования металла околошовной зоны при сварке взрывом алюминия / Е. А. Чугунов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. П. Пеев* // Физ. и химия обработки материалов. — 2001. — № 3. — С. 39–44.
17. *Особенности пластического деформирования металла околошовной зоны при сварке взрывом меди с алюминием / С. В. Кузьмин, А. П. Пеев, В. И. Лысак, Е. А. Чугунов* // Там же. — 2003. — № 1. — С. 71–76.
18. *Лысак В. И., Кузьмин С. В.* Сварка взрывом. — М.: Машиностроение, 2005. — 544 с.
19. *Седых В. С., Соннов А. П.* Расчет энергетического баланса процесса сварки взрывом // Физ. и химия обработки материалов. — 1970. — № 2. — С. 6–13.
20. *Лысак В. И., Седых В. С., Трыков Ю. П.* Определение критических границ процесса сварки взрывом // Свароч. пр-во. — 1973. — № 5. — С. 6–8.
21. *Lysak V. I., Kuzmin S. V.* Explosive welding of metal layered composite materials / Ed. B. E. Paton. — Kiev: E. O. Paton Electric Welding Institute, 2003. — 117 p.

Deformation-energy aspects of explosion welding processes have been analyzed. The established functional correlation between the parameters of this process in combination with the developed mathematical models, enables controlling the energy and temperature-time conditions in the joint zone and formation of the required structure and properties in the produced composite materials. Examples of effective application of explosion welding are given.

Поступила в редакцию 22.02.2008