



РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О НИЖНЕЙ ГРАНИЦЕ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ ВЗРЫВОМ

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

Рассмотрены вопросы, связанные с эволюционным развитием представлений о нижней границе сварки металлов взрывом, взаимосвязи ее положения с параметрами высокоскоростного соударения и массовыми характеристиками соударяющихся пластин. Исходя из анализа накопленного к настоящему времени экспериментального и теоретического материала показано, что нижняя граница может быть изображена в пространстве координат «давление—температура—время», что не противоречит существующим представлениям о нижней границе сварки взрывом.

Ключевые слова: сварка взрывом, пластическая деформация, сварное соединение, граница сварки

При сварке взрывом образование соединения происходит в результате деформационного воздействия на соединяемые материалы, характеризующегося высокой скоростью их соударения при малой длительности контактного взаимодействия. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования этого процесса свидетельствуют о том, что он гармонично вписывается в ряд твердофазных способов соединения металлов, протекающих в условиях термосилового воздействия по единой схеме трехстадийной топокхимической реакции с образованием физического контакта при смятии поверхностных микронеровностей, активации контактных поверхностей, реализуемой в основном по дислокационному каналу, и объемного взаимодействия со слиянием дискретных очагов взаимодействия и релаксацией напряжений. Такая трактовка природы образования соединения в твердой фазе предусматривает, с одной стороны, дискретность процесса образования очагов взаимодействия (активных центров), с другой — коллективность взаимодействия атомов в поле этих активных центров. Процесс схватывания-«сшивания связей» на контактных поверхностях представляется бездиффузионным [1–5], а природа образования соединения независимо от характера и интенсивности термомеханического взаимодействия — единой. Различия заключаются в кинетике протекания отдельных стадий процесса, которая определяется температурно-скоростными условиями деформирования металлов, степенью локализации и механизмами деформации.

Как и любой другой способ получения неразъемного соединения давлением процесс сварки металлов взрывом характеризуется множеством взаимосвязанных и взаимозависимых распределенных параметров [6, 7], совокупность которых

определяет деформационные, температурные и временные условия формирования соединения в твердой фазе. Однако подходы к оценке роли этих параметров в образовании соединения на разных этапах исследования были различными. Изначально, исходя из гидродинамических представлений о процессе сварки взрывом, согласно которым критериями формирования соединения являются самоочистка поверхности кумулятивным потоком и волнообразование, основными параметрами сварки были угол соударения γ и скорость точки контакта V_k .

Р. Уитман [8] первым, аналогично работам по изучению кумуляции [9, 10], предпринял попытку теоретического описания в координатах $\gamma - V_k$ характерных областей и их границ (рис. 1), которые затем неоднократно уточнялись в более поздних работах [11–21]. Согласно Р. Уитману сварные соединения можно получить во II области, ограниченной четырьмя линиями. Справа она ограничивается кривой, рассчитанной из критических условий струеобразования [9, 10, 22]. Правее границы 2 существуют ударные волны, связанные с точкой контакта, а кумуляция отсутствует. Сварные соединения в этой области обычно получить

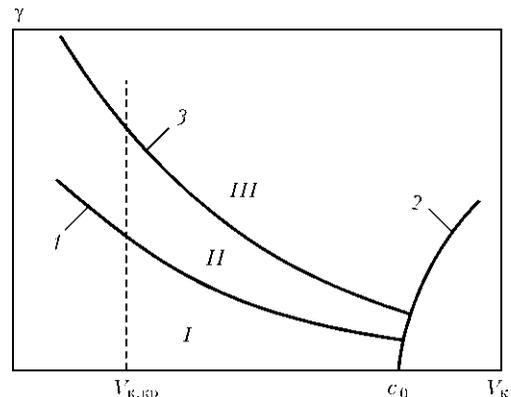


Рис. 1. Характерные области и границы сварки взрывом: 1, 3 — нижняя и верхняя границы; 2 — сверхзвуковая граница; I — область «докритических» режимов (сварка отсутствует); II — область сварки взрывом; III — область «запредельных» режимов



не удается. Положение кривой 2 определяется зависимостью критического угла образования кумулятивной струи γ' от $V_{к.к.р.}$, впервые установленной в работах [9, 10], где показано, что струя при сверхзвуковых режимах соударения может существовать только при превышении γ' .

Слева II область ограничена прямой $V_{к.к.р.}$ — скоростью, при которой происходит переход от волнообразного шва к безволновому, рассчитываемой по формуле из работы [8]:

$$V_{к.к.р.} = \left[\frac{2\text{Re}(HV_1 + HV_2)}{\rho_1 + \rho_2} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где Re — число Рейнольдса; HV_1, HV_2 — твердость по Виккерсу свариваемых металлов; ρ_1, ρ_2 — соответственно плотность свариваемых металлов.

Очевидно, что по целому ряду причин это условие не выдерживает серьезной критики, поскольку переход к безволновому (равнопрочному) шву при малых скоростях контакта определяется не только $V_{к.к.р.}$, но и углом соударения γ (или скоростью соударения V_c) [6, 23], и в то же время для образования прочного соединения процесс волнообразования вовсе не обязателен, в связи с чем эта граница не имеет практического значения.

Сверху II область ограничена кривой 3 (см. рис. 1), положение которой определяется теплофизическими свойствами свариваемых материалов и может быть рассчитано из условия застывания расплавов к моменту прихода в зону соединения волн разрежения [8]

$$V_{c \max} = \frac{1}{N} \left(\frac{T_{пл} c_0}{V_c} \right)^{1/2} \left(\frac{\lambda c c_0}{\rho_1 \delta_1} \right)^{1/4}, \quad (2)$$

где $N \approx 0,1$ — коэффициент; c_0 — скорость звука; λ — теплопроводность; c — теплоемкость; $\rho_1 \delta_1$ — удельная масса метаемой пластины.

Положение нижней границы (см. рис. 1, кривая I) по Р. Уитману определяется критическим давлением соударения, обеспечивающим пластическое течение в околосшовной зоне (ОШЗ), и вычисляется через минимально необходимую для сварки скорость соударения:

$$V_{c \min} = \sqrt{\frac{\sigma_B}{\rho}} \quad \text{или} \quad \gamma_{кр} = \sqrt{\frac{\sigma_B}{\rho V_{л}^2}}. \quad (3)$$

Такое описание и изображение в координатах, характеризующих главным образом «геометрию» соударения пластин при сварке взрывом, явилось на начальном этапе изучения этого процесса пионерским, хотя и базировалось на чисто «механистических» предпосылках формирования сое-

динения, создало фундамент и дало импульс для конкретизации положения границ процесса другим исследователям, предложившим соответствующие зависимости, связывающие критическое значение угла соударения $\gamma_{кр}$ с твердостью по Виккерсу HV [12, 13], пределом текучести σ_T [19, 20, 24], пределом прочности σ_B [11], сопротивлением деформированию S_k [18].

Вместе с тем сопоставление расчетных данных по этим зависимостям положений нижней границы сварки с экспериментальными показало в ряде случаев значительное расхождение, что отмечается, например, в работах [12, 13]. Такое расхождение обычно связывают с неучитываемыми оксидными пленками на поверхностях, чистотой их обработки и др., роль которых, безусловно, очевидна. Однако общим недостатком всех приведенных выше моделей, что и обуславливает расхождение экспериментальных и расчетных данных по предложенным зависимостям, является то обстоятельство, что в них неучтенными остались значительно более «весомые» параметры и прежде всего массовые характеристики соударяющихся металлов.

Авторы работы [20] в более поздней работе [25], основываясь на данных [26], попытались определить нижнюю границу с учетом усредненной массы $\tilde{m} = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ (здесь m_1 и m_2 — единичные, приходящиеся на единицу площади поверхности, массы соответственно метаемой и неподвижной пластин) и выделения из общей энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию приконтактных слоев металла при сварке взрывом W_2 [27] ее доли, локализуемой в зоне шириной, равной размаху (двум амплитудам) образующихся в соединении волн $2a$:

$$V_{c.кр} = \sqrt{\frac{\sigma_{0,2}}{2\rho(1 - V_{к.к.р.}^2/c_0^2)}} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4E_{ст}}{\sigma_{0,2} \delta_1 \delta_2 / (\delta_1 + \delta_2)}} \right), \quad (4)$$

где $V_{c.кр}$ — критическое значение (по аналогии с критическим углом соударения, определяемым положением нижней границы сварки) скорости соударения пластин; $E_{ст} = 0,8 \cdot 2ac\rho T_{пл}$ — энергия, необходимая, по мнению авторов [25], для образования соединения; $T_{пл}$ — температура плавления свариваемых металлов; δ_1, δ_2 — толщины соответственно метаемой и неподвижной пластин.

Такой подход, к сожалению, неоправдан по целому ряду причин. Во-первых, при сварке взрывом абсолютного большинства разнородных металлов (Fe + Al; Ti + Al; Mg + Ti; Mg + Cu; Al + Cu и др.) качественное соединение формируется с безволновой границей. Во-вторых, первичное схватывание и образование сварного соединения при сварке даже однородных металлов на нижней границе происходит в условиях, когда



процесс волнообразования еще просто не существует [8, 13, 28]. Кроме того, не аргументирован выбор и самого критерия — зоны шириной в две амплитуды волны. Очевидно, что связывать явление схватывания с эффектом волнообразования при высокоскоростном соударении нельзя, — последний лишь способствует интенсификации пластической деформации, придавая ей в целом скорее нежелательный для сварки периодический, существенно нестационарный характер с наличием вихревых зон и оплавов.

Существенному продвижению вперед в этом вопросе способствовало установление принципиально важных фактов: значительное влияние усредненной массы слоев \tilde{m} на процесс формирования соединения, существование ее критических $\tilde{m}_{кр}$ и предельных $\tilde{m}_{пр}$ значений (при заданных V_c, V_k, γ), что создало предпосылки к переосмыслению чисто механистической интерпретации критических условий (границ) сварки, описываемых только гидродинамическими явлениями в координатах $\gamma - V_k$, и фундаментальная основа для формирования энергетического подхода к изучаемому процессу. Представления о «процессе образования струи металла из области точки контакта как о необходимом и достаточном физическом процессе, определяющем возможность получения соединения» [13], по существу идентичны представлениям пленочной гипотезы, развиваемой еще в 1950-х годах С. Б. Айнбиндером с сотрудниками [29, 30] и исходящей из того, что термодинамическая вероятность схватывания обусловлена уменьшением свободной энергии системы при исчезновении двух свободных поверхностей, чем исключается необходимость определения термодинамической разрешенности процесса образования межатомных связей.

С учетом массовых характеристик свариваемых материалов положение основных областей сварки взрывом может быть трансформировано в пространство параметров (рис. 2). Подобное преобразование носит принципиальный характер, поскольку, во-первых, любой точке пространства в координатной системе $\tilde{m} - V_c - V_k$ соответствует согласно работе [27] определенное значение энергии W_2 , затрачиваемой на пластическое деформирование металла, а характерным поверхностям, приведенным на рис. 2, — вполне конкретное энергетическое состояние системы соударяющихся пластин.

Во-вторых, установление взаимосвязей \tilde{m} с положением критических границ процесса создало реальный фундамент для объединения позиций так называемых металлофизической и гидродинамической научных школ исследователей данного сложного процесса, поскольку с добавлением к плоскости $\gamma - V_k$, описывающей «внешние» гид-

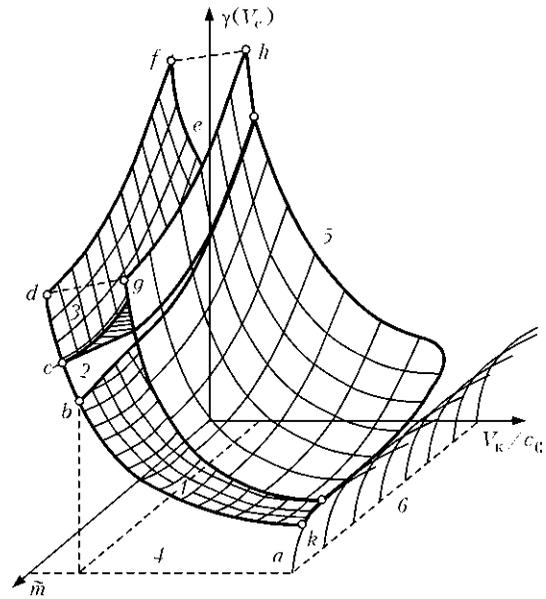


Рис. 2. Положение основных характерных областей сварки металлов взрывом: 1, 2 — соответственно «традиционный» и безволновой режимы; 3 — аномальное волнообразование; 4 — докритические режимы; 5 — развитая кумуляция; 6 — сверхзвуковые режимы

родинамические явления при косых соударениях, массовой оси появилась возможность дать энергетическую, «внутреннюю» интерпретацию процесса схватывания металлов без отвергания существующих представлений.

Подход к описанию процесса схватывания и формирования сварного соединения с энергетических позиций органически следует из теории твердофазных топохимических реакций [1–4], согласно которой для протекания последних атомы на границе раздела металлов необходимо перевести в активированное состояние, сообщив им определенное количество энергии при сварке взрывом путем локализованной и интенсивной пластической деформации.

Пространство параметров, в котором возможно получение сварных соединений, схематически представлено на рис. 2 замкнутой фигурой, расчлененной в передней части плоскостью, перпендикулярной оси \tilde{m} и ограниченной сверху и снизу двумя поверхностями adf (нижняя граница) и kgk (верхняя граница), между которыми расположены три характерные области, отличающиеся феноменологией пластического течения и соответствующим ей профилем остаточных деформаций металла в ОШЗ. Получаемые в области традиционных режимов сварки (рис. 2, область 1) соединения металлов с близкими механическими свойствами отличаются высокой прочностью и синусоидальным профилем линии раздела. В области 2 условия пластического течения неблагоприятны для развития волнообразования вследствие равенства угла соударения и угла между вектором скорости бугра деформации и поверхностью пластин



[23], что вызывает получение прямолинейной границы раздела при высокой прочности соединения слоев. Сварные соединения с аномальными волнами, существующими в области 3, также имеют высокие прочностные свойства.

Правее области сварки расположена обстоятельно изученная в работах [9, 10, 12] область б, в которой существуют ударные волны, связанные с точкой контакта, и сварные соединения обычно получить не удастся. Область больших углов соударения (область 5) соответствует режимам развитой кумуляции и, как и область б, не имеет практического значения для сварочных технологий.

По мере приближения к поверхности *adf* снизу (при постоянных массовых характеристиках свариваемой системы) энергия W_2 [27] увеличивается пропорционально V_c^2 , что приводит к вовлечению в пластическое деформирование больших объемов металла, прилегающего к границе раздела контактирующих слоев, и при достижении некоторого критического уровня энергозатрат, постоянного для каждой пары свариваемых материалов [6, 7, 31], соединение становится равнопрочным.

Положение нижней границы сварки, как это видно из рис. 2, существенно зависит от массовых характеристик свариваемой системы (усредненной массы \tilde{m}) и смещается в сторону меньших значений динамического угла γ или скорости соударения V_c при увеличении \tilde{m} (рис. 3).

Таким образом, в соответствии с существующими энергетическими представлениями образование прочного соединения происходит при превышении некоторого критического уровня энергозатрат, зависящих, в первую очередь, от скорости соударения свариваемых пластин и их массы (или толщин). Однако основной параметр энергетической группы W_2 — энергия или работа, зат-

раченная на пластическую деформацию металла ОШЗ, — хоть формально и связан с условиями соударения и массовыми характеристиками (т. е. толщинами) свариваемых элементов, но описывает лишь в обобщенном виде конечный результат их высокоскоростного взаимодействия, не раскрывая взаимосвязей между другими физическими параметрами процесса — давлением, временем его действия и температурой в зоне соединения.

В работах [6, 32] для взаимоувязывания давления и времени был предложен новый параметр — деформирующий импульс давления I_d , в общем случае описывающийся уравнением

$$I_d = \int_0^{\tau_0} p(\tau) d\tau = \int_0^{\tau_c} p_{\max} e^{-\tau/\theta} d\tau, \quad (5)$$

где p_{\max} — пиковое давление в точке контакта свариваемых пластин; τ_c — время протекания пластических деформаций за точкой контакта (или время сварки); θ — постоянная времени, характеризующая темп спада давления в зоне соединения (для алюминия и стали Ст3 θ составляет соответственно примерно 0,565 и 0,96 мкс).

Интегральный параметр I_d по сути определяет энергетические условия формирования соединения. Так, давление p , действующее на приконтактные слои соединения в течение некоторого времени, совершает определенную работу по пластическому деформированию металла в них. При этом чем выше уровень давления и продолжительнее его действие, тем большая часть кинетической энергии метаемого элемента W энергии затрачивается на пластическую деформацию металла ОШЗ W_2 , определяя, в конечном счете, энергетический баланс в системе.

Таким образом, деформирующий импульс давления I_d является некоторым «мостиком» к параметрам «микроуровня» [33], связывая воедино изменяющееся во времени давление в зоне соединения (пиковое значение которого определяется скоростью соударения свариваемых элементов) и время его действия с кинематикой и энергетикой процесса, с одной стороны, и степенью пластической деформации, полнотой протекания активационных процессов в зоне контакта и в итоге прочностью соединения слоев, — с другой.

Обобщение большого количества экспериментальных данных позволило определить (по аналогии с критическими энергозатратами [31]) некоторое критическое значение деформирующего импульса давления, ниже которого равнопрочное соединение получить невозможно. В обобщенном виде выявленная закономерность, связывающая прочность сварного соединения Ст3 + Ст3 со значением I_d , представлена на рис. 4. На эту же координатную плоскость нанесены эксперименталь-

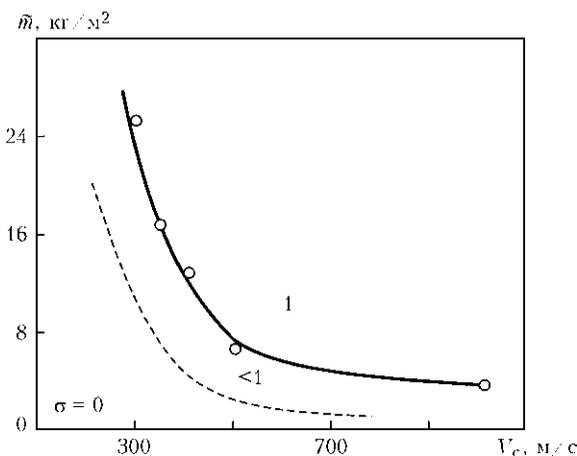


Рис. 3. Положение нижней границы сварки стали 12X18H10Т со сталью Ст3 в зависимости от усредненной массы \tilde{m} свариваемых пластин (штриховая кривая — граница схватывания, нанесенная условно)



ные точки, пересчитанные из данных ряда других исследователей. Видно, что увеличение прочности сварного соединения начинается примерно с $0,9...1 \text{ кН}\cdot\text{с}/\text{м}^2$, равнопрочной же указанная композиция становится, начиная примерно с $3,5...3,7 \text{ кН}\cdot\text{с}/\text{м}^2$, что позволяет в первом приближении считать это значение критической величиной деформирующего импульса давления $I_{д,кр}$ для данной пары материалов.

Значение деформирующего импульса в общем случае можно регулировать либо путем варьирования толщин свариваемых пластин, изменяя тем самым продолжительность действия давления в зоне соединения, либо изменением пикового давления в зоне соединения за счет скорости соударения V_c . При решении же практических задач сварки взрывом конкретных композиций, когда толщины свариваемых элементов, как правило, строго лимитированы, единственно приемлемым остается второй путь. Тем не менее чисто гипотетически нижнюю границу сварки взрывом в координатах «давление p — время τ » можно представить гиперболической зависимостью, изображенной на рис. 5. Здесь оси давления и времени в некоторой степени эквивалентны соответствующим осям $\gamma(V_c)$ и \tilde{m} ранее построенной области сварки (см. рис. 2).

Третья координатная ось V_k (см. рис. 2) может быть сопоставлена с еще одним важным физическим параметром процесса — температурой металла T в зоне соединения, которая, согласно теории топохимических реакций, способствует образованию соединения в твердой фазе, увеличивая, с одной стороны, частоту выхода дислокаций в зону соединения (частоту образования активных центров), с другой, — уменьшая время активации, т. е. время, в течение которого происходит схватывание металлов в пределах активных центров до их естественной релаксации.

Начальная тепловая ситуация в зоне соединения при сварке взрывом неразрывно связана с распределением максимальных сдвиговых пластических деформаций по сечению сваренных элементов [6, 37]. При этом в некотором произвольном элементарном слое металла толщиной dy , отстоящем от линии соединения на расстоянии y , выделившееся тепло пропорционально элементарной работе деформирования

$$\delta A_d = S_k g_{\max}(y) dy, \quad (6)$$

где S_k — сопротивление деформации, численно равное динамическому пределу текучести σ_T^d ; $g_{\max}(y)$ — текущее значение максимальной сдвиговой пластической деформации.

Полная удельная (отнесенная к единице площади сварного образца) работа деформирования (или, что то же самое, энергия, затраченная на

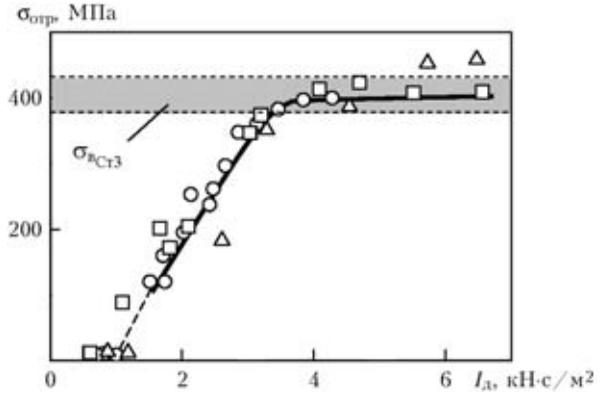


Рис. 4. Влияние деформирующего импульса давления I_d на прочность $\sigma_{отпр}$ биметалла из низкоуглеродистой стали: \square , Δ — данные А. Н. Кривенцова [33, 34], В. Г. Шморгуна [35], В. А. Пронина [36]; \circ — данные авторов

пластическую деформацию металла ОШЗ) может быть вычислена путем интегрирования

$$A_d = S_k \int_0^{\delta} g_{\max}(y) dy. \quad (7)$$

Сделав допущение, что тепло во всех слоях выделяется одновременно, несложно оценить тепловую ситуацию в ОШЗ сварного соединения, т. е. рассчитать начальные температурные поля. Так, для произвольного слоя y его температура в начальный момент времени $t = 0$ с учетом выражения (6) равна

$$T(y) = \frac{S_k g_{\max}(y) dy}{c\rho dy} + T_0 = \frac{S_k g_{\max}(y)}{c\rho} + T_0. \quad (8)$$

Теперь, зная закон изменения $g_{\max}(y)$ по толщине пластины, можно для произвольного сечения построить начальные температурные поля (рис. 6).

Следует отметить, что с увеличением скорости точки контакта V_k температура приконтактных слоев свариваемых материалов существенно воз-

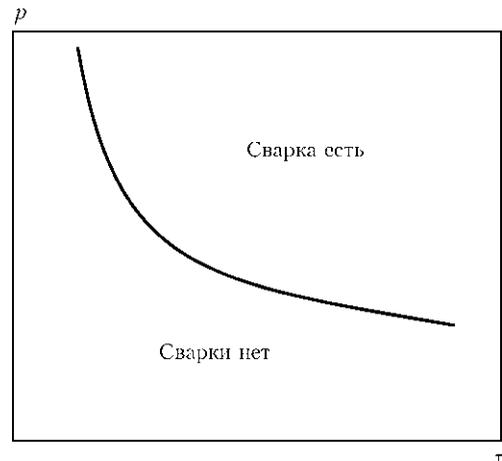


Рис. 5. Гипотетическое представление нижней границы сварки в координатах «давление p — время τ »

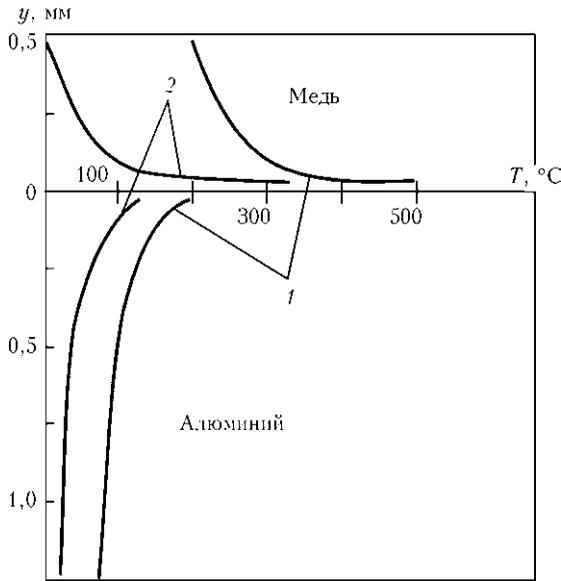


Рис. 6. Распределение температур в сечении сваренного взрывом медно-алюминиевого композита: 1 — $V_k = 2600$; 2 — 2000 м/с

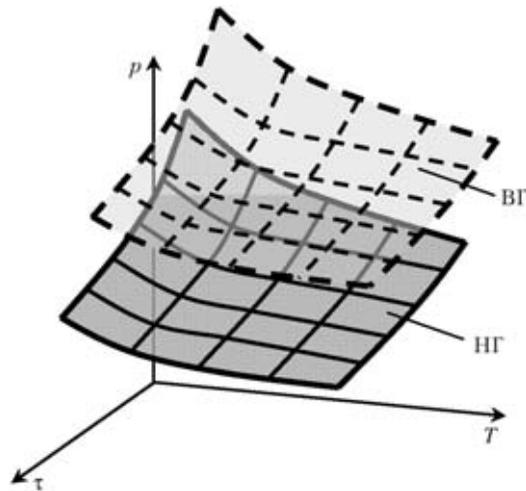


Рис. 7. Область сварки взрывом в координатах « p - T - τ » (НГ и ВГ — соответственно нижняя и верхняя границы сварки)

растает (в предельном случае, при приближении к околосвуковым скоростям, в зоне соединения происходит их оплавление, а в соединении наблюдается сплошная прослойка оплавленного металла), что согласно основным положениям теории топохимических реакций «облегчает» процесс схватывания, а необходимые уровни время-силовых факторов образования соединения могут быть снижены.

Таким образом, с учетом всех представленных выше рассуждений можно перейти к отображению нижней границы сварки металлов взрывом в координатах «давление p – температура T – время τ » (рис. 7), очертания которой не противоречат существующим представлениям и положениям границ сварки, построенным ранее.

Небезынтересным представляется сопоставление расположений в этих же координатах облас-

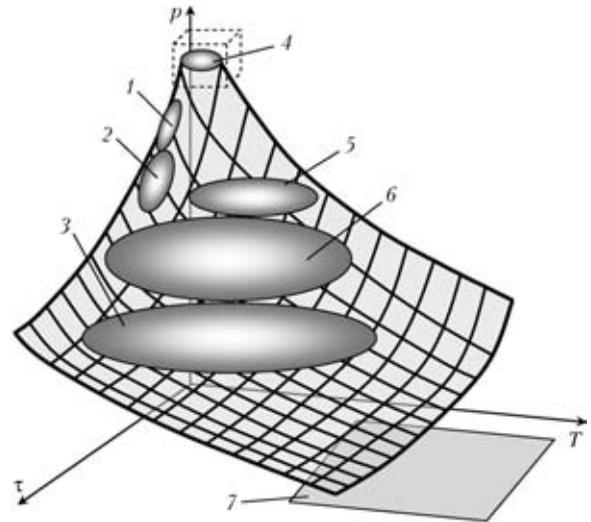


Рис. 8. Области параметров различных способов сварки в координатах « p - T - τ » (штриховой квадрат — область, изображенная на рис. 7): 1 — холодная сварка (p , МПа; τ , мс; $T \sim 0,2T_{пл}$); 2 — сварка прокаткой в холодную (p , МПа; τ , мс; $T \sim 0,2T_{пл}$); 3 — диффузионная сварка (p , кПа; τ , с; $T \sim 0,9T_{пл}$); 4 — сварка взрывом, магнитно-импульсная сварка (p , ГПа; τ , мкс; $T \sim 0,6T_{пл}$); 5 — сварка прокаткой (p , МПа; τ , мс; $T \sim 0,7T_{пл}$); 6 — контактная сварка (p , МПа; τ , мс; $T \sim 0,8T_{пл}$); 7 — сварка плавлением (p , Па; τ , с; $T > T_{пл}$)

тей параметров, характерных для различных способов сварки (рис. 8). Сварка взрывом (как и магнитно-импульсная) с характерными для нее весьма малыми временами образования соединения и экстремально высокими давлениями занимает верхний угол координатной области. Другие способы располагаются значительно ниже. Это еще раз свидетельствует о том, что сварка взрывом не является каким-то «экзотическим», отдельно стоящим процессом соединения металлов, а логически вписывается в круг известных способов, органически их дополняя.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 02.523.12.3012.

1. Каракозов Э. С. Соединение металлов в твердой фазе. — М.: Металлургия, 1976. — 264 с.
2. Красулин Ю. Л. Взаимодействие металла с полупроводником в твердой фазе. — М.: Наука, 1971. — 119 с.
3. Красулин Ю. Л. Дислокации как активные центры в топохимических реакциях // Теорет. и эксперим. химия. — 1967. — III, вып. 1. — С. 58–65.
4. Красулин Ю. Л., Шориоров М. Х. О механизме образования соединения разнородных материалов в твердом состоянии // Физ. и хим. обработки материалов. — 1967. — № 1. — С. 89–97.
5. Шориоров М. Х., Каракозов Э. С., Фоменко В. А. Особые виды сварки. — (Итоги науки и техники. Сер. Сварка; Т. 5). — М.: ВИНТИ, 1972. — С. 46–152.
6. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Сварка взрывом. — М.: Машиностроение, 2005. — 544 с.
7. Lysak V. I., Kuzmin S. V. Explosive welding of metal layered composite materials / Ed. B. E. Paton. — Kiev: E. O. Paton Electric Welding Institute NASU, 2003. — 117 p.
8. Wittman R. H. The influence of collision parameters on the strength and microstructure of an explosion welded aluminum alloy // Use of explosive energy in manufacturing metal-



- lic materials of new properties: Mater. 2nd Intern. symp. — Marianske Lasne, 1973. — P. 153–158.
9. Cowan G., Holtzman A. Flow configuration in colliding plates // J. Appl. Phys. — 1963. — 34, № 4. — P. 928–939.
 10. Walsh J. M., Shreffler R. G., Willig F. J. Limiting conditions for jet formation in high velocity conditions // Ibid. — 1953. — 24, № 3. — P. 349–359.
 11. Беляев В. И., Девойно Д. Г., Касперович В. Б. О нижней границе режимов сварки взрывом // Порошк. металлургия. — 1978. — С. 51–56.
 12. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1980. — 220 с.
 13. Захаренко И. Д. Сварка металлов взрывом. — Минск: Наука і тэхніка, 1990. — 205 с.
 14. Карпенгер С. Сварка металлов взрывом. — Минск: Беларусь, 1976. — 43 с.
 15. Петушков В. Г., Фадеев Ю. И. О границах области сварки металлов взрывом с учетом влияния вязкости металлов // Сварка металлов и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолгГТУ, 1998. — С. 42–51.
 16. Роман О. В., Смирнов Г. В., Ушеренко С. М. Динамика высокоскоростной деформации и кумулятивные эффекты при сварке металлов взрывом // Там же. — 1998. — С. 51–64.
 17. Седых В. С., Соннов А. П. Определение «нижней границы свариваемости» металлов при сварке взрывом // Там же. — С. 63–66.
 18. Смелянский В. Я., Рыскулов М. Т., Кожевников В. Е. К вопросу о расчете режимов сварки взрывом разнородных металлов // Там же. — С. 54–62.
 19. Соннов А. П. Влияние исходной прочности соединяемых металлов на режимы их сварки взрывом // Там же. — С. 3–7.
 20. Соннов А. П., Шморгу В. Г. Расчет нижней границы сварки взрывом однородных металлов // Там же. — С. 47–54.
 21. Deribas A. A. Explosive welding: Weldability range // VII Intern. symp. on application of explosion to preparation of new materials, Sept. 11–14, 2006, Moscow. — Moscow: TORUS PRESS Ltd., 2006. — P. 28–34.
 22. Кузьмин Г. Е., Яковлев И. В. Исследование соударения пластин со сверхзвуковой точкой контакта // Физ. горения и взрыва. — 1973. — 9, № 5. — С. 746–753.
 23. Кузьмин С. В., Лысак В. И. Основные закономерности перехода к безволновым режимам формирования соединения при сварке взрывом // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолгГТУ, 1991. — С. 29–38.
 24. Высокоскоростная деформация металлов / В. И. Беляев, В. Н. Ковалевский, Г. В. Смирнов, В. А. Чекан. — Минск: Наука и техника, 1976. — 224 с.
 25. Шморгу В. Г., Пронин В. А., Жданов В. Д. К вопросу расчетной оценки рациональных режимов сварки взрывом // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолгПИ, 1988. — С. 68–74.
 26. Лысак В. И., Седых В. С., Трыков Ю. П. Энергетические параметры сварки взрывом многослойных композиционных соединений // Материалы междунар. симп. по использованию энергии взрыва для производства металлических материалов с новыми свойствами. — Готвальдов (ЧССР), 1979. — С. 152–162.
 27. Седых В. С., Соннов А. П. Расчет энергетического баланса процесса сварки взрывом // Физ. и химия обработки материалов. — 1970. — № 2. — С. 6–13.
 28. Добрушин Л. Д. К вопросу о нижней границе сварки взрывом // Автомат. сварка. — 1979. — № 6. — С. 64–65.
 29. Айнбиндер С. Б., Клокова Э. Ф. Некоторые вопросы теории сцепления металлов при совместной пластической деформации // Изв. АН ЛатвССР. — 1958. — № 12. — С. 141–154.
 30. Айнбиндер С. Б. Холодная сварка металлов. — Рига: Изд-во АН ЛатвССР, 1957. — 162 с.
 31. Лысак В. И., Седых В. С., Трыков Ю. П. Определение критических границ процесса сварки взрывом // Сварочн. пр-во. — 1973. — № 5. — С. 6–8.
 32. Кузьмин С. В., Лысак В. И., Чувичилов В. А. Деформационно-временные условия формирования соединений при сварке взрывом // Сварка и диагностика. — 2008. — № 1. — С. 6–13.
 33. Кривенцов А. Н., Седых В. С. О роли пластической деформации металла в зоне соединения при сварке взрывом // Физ. и химия обработки материалов. — 1969. — № 1. — С. 132–141.
 34. Ватник Л. Е., Кривенцов А. Н., Седых В. С. Некоторые особенности образования соединения при сварке взрывом листового биметалла // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолгПИ. — 1974. — Вып. 1. — С. 35–45.
 35. Шморгу В. Г. Разработка технологии сварки взрывом титана со сталью по затратам энергии на пластическую деформацию в зоне соединения: Дис. ... канд. техн. наук. — Волгоград: ВолгПИ, 1987. — 163 с.
 36. Пронин В. А. Обоснование и разработка технологии сварки взрывом электротехнических узлов из пластичных металлов зарядами пониженной мощности: Дис. ... канд. техн. наук. — Волгоград: ВолгПИ, 1986. — 230 с.
 37. Пеев А. П., Кузьмин С. В., Лысак В. И. Распределение температуры в околошовной зоне при сварке разнородных металлов взрывом // Автомат. сварка. — 2004. — № 4. — С. 9–12.

The paper deals with subjects related to evolutionary development of concepts of the lower boundary of explosion welding of metals, interrelation of its position with parameters of high-speed collision and mass characteristics of the colliding plates. Proceeding from analysis of the experimental and theoretical data accumulated so far, it is shown that the lower boundary can be presented in the space of «pressure-temperature-time coordinates», which is not contradictory to the current concepts of the lower boundary of explosion welding.

Поступила в редакцию 05.08.2009