

УДК 531.663 + 621.791.13

ТЕЧЕНИЯ, ДЕФОРМАЦИИ И ОБРАЗОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ КОСОМ СОУДАРЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

А. А. Штерцер, Б. С. Злобин

Конструкторско-технологический филиал Института гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: asterzer@mail.ru, zlobin.boris@mail.ru

Рассмотрены процессы высокоскоростного косоугольного соударения металлических пластин, приводящие к их соединению (схватыванию). Установлено, что необходимое для схватывания очищение поверхности пластин происходит в результате струйного течения (потока частиц), источником которого является как минимум один из свариваемых материалов или промежуточный слой из пластичного материала, расположенный на начальном участке соударения. Показано, что дополнительное очищение может происходить за счет возникновения вращающихся микрообластей в условиях локализованных в области соединения интенсивных градиентных течений, схватывание по очищенным поверхностям происходит за счет уменьшения поверхностной энергии системы.

Ключевые слова: косоугольное соударение, струйное течение, локализация деформации, очищение поверхности, схватывание.

DOI: 10.15372/PMTF20150521

Введение. Высокоскоростное (несколько сотен метров в секунду) косоугольное соударение металлических пластин наиболее широко применяется при сварке взрывом [1–5], также косоугольное соударение можно осуществить другими способами, например путем магнитно-импульсного воздействия [6]. Сварка взрывом применяется в течение более 50 лет, однако механизмы образования прочного соединения и необходимые для этого условия полностью не изучены.

Ряд исследователей считает, что поверхностные пленки выносятся кумулятивным потоком частиц [1, 3, 7], поэтому необходимым и достаточным условием для осуществления сварки считается струеобразование. Авторы работ [4, 8–10] придерживаются деформационного подхода, согласно которому главная роль в подготовке поверхностей к соединению отводится пластической деформации. В работах [11, 12] предложена концепция, согласно которой поверхностные пленки удаляются вследствие воздействия находящегося в сварочном зазоре газа, нагретого движущейся перед точкой контакта ударной волной.

Представляет интерес изучение процесса соединения, имеющего место после того, как очищенные поверхности пластин начинают контактировать. Образованию соединения между двумя твердыми телами при их совместной деформации, называемому сваркой, а также адгезией и схватыванием, посвящено большое количество работ, достаточно полный обзор которых приведен в [4]. Эксперименты на металлах с очищенными поверхностями

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ (грант № 2695.2014.1).

© Штерцер А. А., Злобин Б. С., 2015

в высоком вакууме показывают, что даже при слабых сжимающих нагрузках происходит моментальное схватывание по поверхности контакта двух тел [13–16]. Результаты этих экспериментов свидетельствуют о том, что основным препятствием для схватывания, по крайней мере металлов, являются поверхностные пленки. Существует точка зрения, согласно которой для схватывания (после удаления пленок) необходима также активация атомов на контактных поверхностях [4, 17–19]. Однако авторы работ [20–22] полагают, что после удаления пленок и сближения атомов процесс схватывания происходит самопроизвольно и необходимость в активации отсутствует.

В настоящей работе доказывается, что струеобразование как предельный случай локализации деформации является основным механизмом удаления поверхностных пленок и подготовки поверхностей к сварке. Соединение чистых поверхностей происходит самопроизвольно за счет уменьшения поверхностной энергии системы.

Процесс волнообразования не рассматривается, так как прочное соединение может быть получено как при наличии, так и в отсутствие волн в области соединения.

1. Течения и деформации, возникающие при косом соударении пластин.

Для описания высокоскоростного косоугольного соударения пластин используются следующие параметры: γ — угол соударения, V_c — скорость точки контакта, V_p — скорость пластины (рис. 1). Для каждой пары металлов на плоскости (V_c, γ) существует область параметров V_c, γ , при которых образуется прочное соединение (область сварки) (рис. 2) [1]. Здесь c — скорость звука, $c^2 = K/\rho$, $K = E/(3(1 - 2\mu))$ — модуль объемного сжатия, E — модуль Юнга, μ — коэффициент Пуассона. В [1, 3] показано, что положение нижней границы области сварки зависит от прочности, плотности материала и толщины поверхностных загрязняющих пленок, а также приведена формула для расчета этой границы:

$$\gamma = k\sqrt{H_v/(\rho V_c^2)}, \quad (1)$$

где H_v — твердость материала по Виккерсу; ρ — плотность свариваемого металла; $k = 5,5(\delta_{ox}/\delta_p)^{0,18}$; δ_{ox} — толщина поверхностной пленки; δ_p — толщина метаемой пластины. Как правило, в практике сварки взрывом коэффициент $k = 0,6 \div 1,2$, в случае материалов с естественными оксидными слоями $k = 1,14$.

Зависимость положения нижней границы от толщины загрязняющих пленок свидетельствует о том, что при косом соударении возникают течения, обеспечивающие очищение свариваемых поверхностей. Удаление поверхностного слоя загрязнений и обеспечение контакта чистых поверхностей возможно двумя способами: 1) поверхностный слой выносятся в зазор между пластинами, и за точкой контакта O (см. рис. 1) происходит контакт чистых металлических поверхностей; 2) при деформации пластин за точкой контакта O

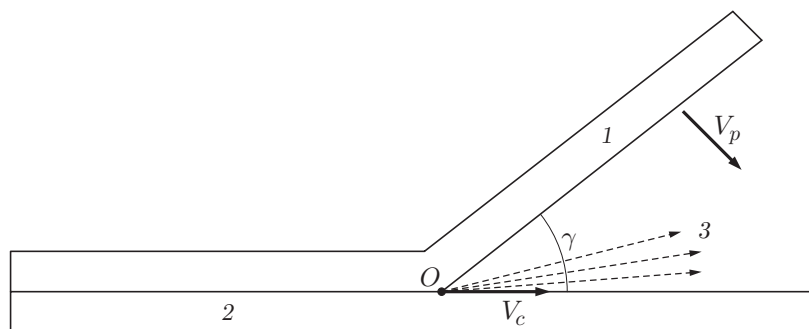


Рис. 1. Схема косоугольного соударения пластин:

1 — метаемая пластина, 2 — неподвижная пластина, 3 — кумулятивная струя (поток частиц)

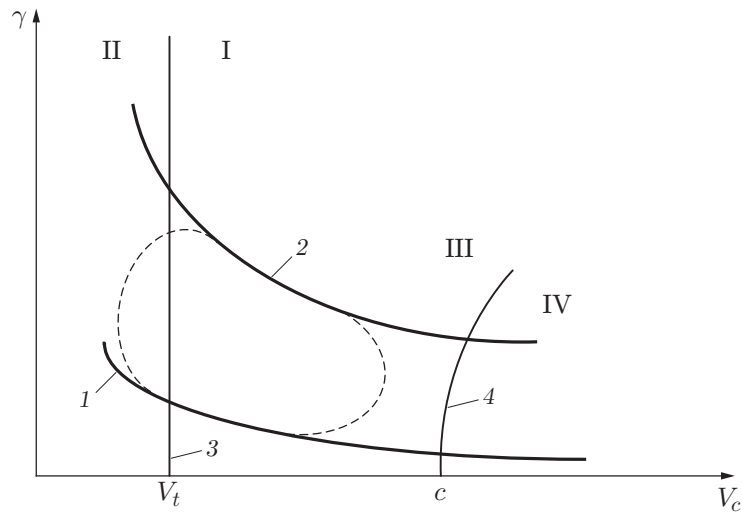


Рис. 2. Плоскость параметров V_c , γ :

1 — нижняя граница, 2 — верхняя граница, 3 — граница, разделяющая области сварки при наличии (I) и отсутствии (II) волнообразования; 4 — правая граница, разделяющая области при наличии (III) и отсутствии (IV) струеобразования; штриховая линия — граница области сварки, полученной экспериментально

пленки переносятся вглубь материала, а в область соединения выносятся глубинные атомы, вступающие во взаимодействие.

Реализация первого механизма обусловлена струеобразованием — кумулятивным эффектом, проявляющимся при косом соударении. Возможность переноса поверхностных слоев вглубь материала по второму механизму зависит от степени локализации деформации в окрестности области соединения. Рассмотрим оба указанных механизма.

1.1. *Струеобразование.* Согласно гидродинамической теории, описывающей соударение металлических пластин как столкновение струй жидкости, в зазоре всегда возникает истекающая из точки контакта кумулятивная струя (см. рис. 1). Однако наличие у материала таких свойств, как сжимаемость, прочность и вязкость, приводит к тому, что не при всех значениях параметров столкновения V_c , γ возникает струя и ее скорость меньше, чем рассчитанная по гидродинамической теории [23, 24]. Правая граница области сварки (см. рис. 2) связана с другим критерием струеобразования $V_c \cos \gamma \leq c$ [7, 24]. В [25, 26] с помощью методов молекулярной динамики показано, что в отсутствие загрязняющих пленок при косом соударении пластин соединение возникает при всех значениях V_c , не превышающих некоторого критического значения.

Струя может быть как сплошной, так и диспергированной, т. е. представлять собой поток отдельных частиц [3, 24]. В диапазоне характерных для получения соединения скоростей точки контакта ($V_c = 2 \div 3$ км/с) компактная струя начинает образовываться при $\gamma > 30^\circ$, при меньших значениях угла γ наблюдается поток из отдельных частиц, движущихся со скоростью $(1,0 \div 1,3)V_c$ [3]. В любом случае струя состоит из материала поверхностных слоев сталкивающихся пластин. В работе [27] установлено, что при сварке в вакууме алюминиевой (толщиной 3 мм) и стальной пластин основной поток состоит из частиц алюминия, имеющих средний размер 0,5 мкм. В данном эксперименте получено прочное соединение, положение нижней границы определялось на основе прочностных характеристик алюминия. Этот результат соответствует сделанному в [28] предположению, что для очищения стальной поверхности достаточно образования чисто алюминиевой струи. Фактически это означает, что поток частиц алюминия, образовавшийся при

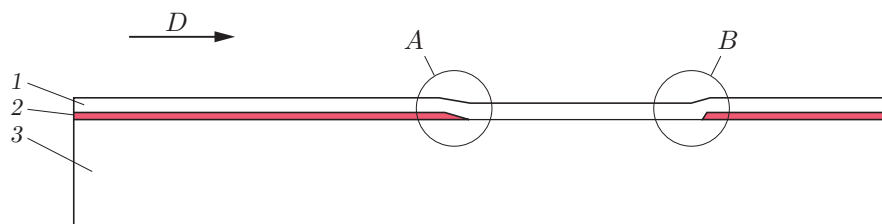


Рис. 3. Схема образца с соединением сталь — медь — сталь и сталь — сталь: 1 — стальной слой с твердостью 32 HRC, 2 — медная прослойка, 3 — стальная подложка с твердостью 42 HRC; A, B — окрестности концов медной прослойки, D — направление движения фронта детонации при сварке

формировании струи из поверхностных частиц алюминиевой пластины, очищает и нагревает поверхность стальной пластины. В [29, 30] экспериментально и численно показано, что установлению прочного соединения предшествует появление потока частиц, который в [29] фиксировался с помощью специальных мишеней. Скорость потока частиц, измеренная с помощью размещенных в зазоре электроконтактных датчиков, в $1,27 \div 1,54$ раза меньше скорости, рассчитанной по гидродинамической теории. Эти данные согласуются с данными [23].

Таким образом, результаты, полученные в различных работах, свидетельствуют о том, что при сварке взрывом происходит самоочищение поверхностей за счет струеобразования. Поэтому генерирование потока частиц при косом соударении полагается необходимым условием сварки взрывом [3, 7, 31]. Из экспериментов по сварке существенно различающихся по прочности материалов следует, что соединение образуется в основном за счет деформационных процессов, развивающихся в менее прочном материале [32].

Для того чтобы определить степень воздействия струи на образование соединения, проведены эксперименты по получению соединения между твердыми сталями (рис. 3). Стальная пластина 3, закаленная до твердости 42 HRC, сначала плакировалась медной лентой толщиной 0,8 мм. Затем медная плакировка 2 фрезеровалась до получения толщины 0,3 мм. В средней части пластины медный слой полностью удалялся (см. рис. 3). На подготовленную таким образом биметаллическую пластину металась стальная пластина 1 (твердость 32 HRC). Положение нижней границы области сварки рассчитывалось по формуле (1) с использованием значения прочности меди. Металая стальная пластина приваривалась и к покрытой медью поверхности, и к стальной основе между зонами A и B (см. рис. 3). Граница соединения сначала имела отчетливо выраженный волновой характер (рис. 4,а), затем медная прослойка существенно вытягивалась в направлении движения точки соударения (рис. 4,б). Толщина медной прослойки в зоне A (см. рис. 3) постепенно уменьшалась, а затем фрагментировалась с образованием облака частиц. О наличии этого облака свидетельствует то, что в зоне A на границе сталь — сталь имеются участки с массовой долей меди $16 \div 23$ %. Между зонами A и B на границе сталь — сталь в области соединения также присутствует медь (массовая доля $1,5 \div 3,0$ %). В зоне B торец медной прослойки сыграл роль ловушки для потока медных частиц. Перед этой прослойкой образовалась область перемешивания стали и меди с массовой долей меди $60 \div 76$ %. (Эти данные получены с помощью сканирующего электронного микроскопа MERLIN Contrast компании ORTEC, оснащенного рентгеновским микроанализатором INCA X-max компании Oxford Instruments.)

Следует отметить, что при наличии медной прослойки сварка на участке сталь — сталь между зонами A и B имела место, в то время как при тех же параметрах соударения, но без прослойки меди получить соединение стальных пластин с такой же твердостью

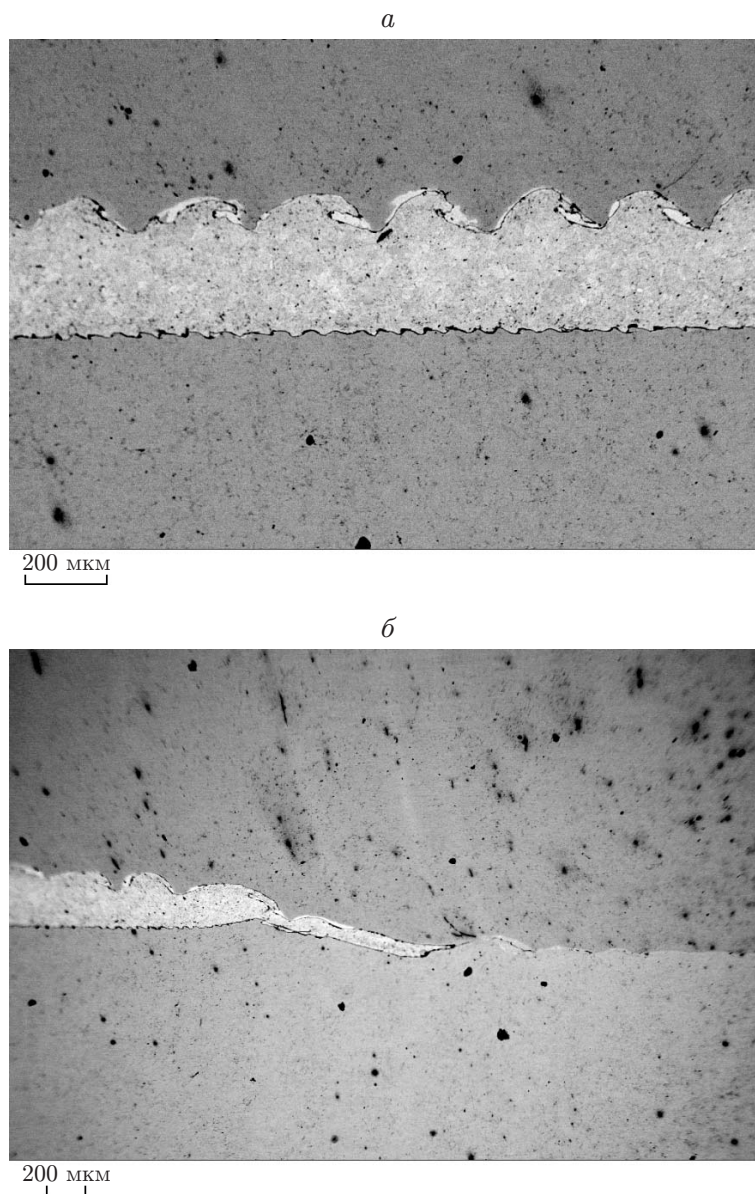


Рис. 4. Граница области соединения пластин сталь — медь — сталь левее области А (а) и пластин сталь — медь — сталь и сталь — сталь в области А (б) (см. рис. 3)

не удалось. Это свидетельствует о том, что поток медных частиц очищает поверхности стальных пластин от пленок и, очевидно, разогревает их. Таким образом создаются условия для образования соединения между высокопрочными металлами.

С учетом изложенного выше можно утверждать, что струеобразование является необходимым и достаточным условием образования соединения при косом соударении. Очищающее действие струи является двойным: во-первых, струя образуется из выносимых в зазор поверхностных частиц, во-вторых, эти высокоскоростные частицы “чищают” поверхность перед точкой контакта (см. рис. 1).

1.2. *Локализация деформации.* Как указывалось выше, ряд исследователей придерживается деформационного подхода, объясняя процесс образования прочного соединения прежде всего наличием пластической деформации [4, 8, 9]. Для исследования остаточных деформаций в биметалле с 60-х гг. XX в. применяются прямые методы измерений, такие

как нанесение координатных сеток и реперных линий [8, 33]. Несмотря на то что эти методы не являются достаточно точными, особенно в случае когда градиенты деформаций (скоростей течения) велики, их использование позволило обнаружить существенное увеличение остаточных деформаций в биметалле при приближении к границе соединения. Более точные результаты можно получить, оценивая деформационные течения путем анализа микроструктуры. Например, в работах [9, 10] утверждается, что условием образования прочного соединения в области нижней границы является появление зоны интенсивной пластической деформации с полосой локализации вдоль границы соединения. При этом возникает сдвиговая неустойчивость материала, вследствие чего он начинает вести себя как идеальная жидкость. В полосе локализации величина логарифмических сдвиговых деформаций превышает значение, равное трем. Согласно исследованиям [34, 35] микроструктуры биметаллов в окрестности границы соединения в слоях толщиной до нескольких десятков микрометров материал становится мелкозернистым и приобретает высокую плотность дислокаций, что свидетельствует о значительных пластических деформациях.

Существенное увеличение остаточных деформаций при приближении к границе соединения, в свою очередь, свидетельствует о том, что в этой области, характеризующейся высоким градиентом скоростей, течение материала имеет гидродинамический характер. Заметим, что гидродинамический (струеобразование) и деформационный механизмы самоочищения поверхностей не противоречат друг другу. Существенное увеличение локализации деформации по мере приближения к области соединения свидетельствует о том, что в тонких поверхностных слоях соударяющихся пластин возникают гидродинамические течения с генерацией струи (потока частиц). Это подтверждают также результаты проведенных экспериментов (см. рис. 4, б).

Известно, что при больших пластических деформациях отдельные участки среды вращения как целое и возникают области размером до нескольких десятков микрометров с углами кристаллической разориентировки в несколько десятков градусов [36]. Вращению предшествует фрагментация структуры, возникающая в пластически деформируемых кристаллах при всех режимах нагружения в широком диапазоне температур и скоростей деформации $\dot{\varepsilon}$, независимо от исходной структуры материала, его химического и фазового составов, энергии дефектов упаковки, электронного строения и типа кристаллической решетки. Единственным необходимым условием является достижение пороговой деформации ε_0 . При $\varepsilon \geq \varepsilon_0$ одноосно ориентированный кристалл начинает дробиться. Деформация ε_0 существенно зависит от структуры материала: в поликристаллах она может быть в несколько раз меньше, чем в монокристаллах. Полуэмпирическая формула для определения угла поворота (разориентировки) кристаллических областей в зависимости от степени деформации имеет вид [36]

$$\Omega = \beta(T)(\varepsilon - \varepsilon_0). \quad (2)$$

Если ε_0 слабо зависит от температуры T , то β зависит от нее существенно. С увеличением T коэффициент β уменьшается вследствие ускорения релаксационных процессов, приводящих к снижению внутренних напряжений, моменты которых обеспечивают пластические развороты микрообластей. При низкотемпературном деформировании $\beta \approx 1$, при $T = T_m/2$ (T_m — температура плавления) $\beta \approx 0,6$. Соответствующие значения для ε_0 следующие: при $T = (0,1 \div 0,2)T_m$ $\varepsilon_0 \approx 0,3$ для поликристаллов и $\varepsilon_0 \approx 0,5$ для монокристаллов, при $T = 0,5T_m$ $\varepsilon_0 \approx 0,2$ для поликристаллов.

Коэффициент β имеет следующий физический смысл. Пластические деформации, обусловленные градиентным течением твердого тела, могут осуществляться двумя способами: 1) линии тока параллельны, и перенос материала в направлении, перпендикулярном линиям тока, отсутствует (аналог ламинарного течения в гидродинамике); 2) микрооб-

ласти совершают вращательное движение подобно роликам в подшипнике, чем обеспечивается перемещение слоев материала относительно друг друга (аналог турбулентного течения). В случае когда деформации происходят только за счет вращения микрообластей (качение роликов), $\beta = 1$, в случае чисто ламинарного течения $\beta = 0$. При реальных деформациях в случае $\varepsilon > \varepsilon_0$ имеют место и ламинарное, и турбулентное течения, поэтому $\beta = 0 \div 1$. При увеличении температуры объемная доля жестких (недеформируемых) вращающихся микрообластей в материале уменьшается, поэтому значение β также уменьшается.

За счет включения ротационных компонент пластическая деформация может обеспечить дополнительную очистку поверхности. Вращение микрообластей приводит к перемещению оставшихся в зоне контакта загрязнений вглубь материала и выносу объемных атомов на контактную поверхность. Градиентные течения при наличии вращений описаны с использованием уравнений вязкой несжимаемой жидкости в работе [37], в которой твердое тело при больших пластических деформациях рассматривается в качестве вязкой жидкости с твердыми включениями и показано, что перенос пленок вглубь материала ускоряется, когда техническая деформация достигает значения $\varepsilon_t = 3,8$. С использованием (2) находим, что в случае нагретого металла при $\varepsilon_t = 3,8$ угол поворота микрообластей $\Omega \approx 120^\circ$. Согласно [37] при $\varepsilon_t = 3,8$ $\Omega = 90^\circ$, что обусловлено использованием уравнения Навье — Стокса вместо уравнений механики деформируемого твердого тела. В случае если толщина поверхностной пленки значительно меньше размера вращающихся микрообластей, фрагменты пленки переносятся достаточно глубоко в объем материала и не препятствуют образованию соединения. Результаты расчетов процесса соударения покрытой окисной пленкой металлической частицы с подложкой с применением метода молекулярной динамики также показывают, что к образованию соединения приводят интенсивные деформации в области контакта [38].

Таким образом, если на макроуровне течение среды можно рассматривать как ламинарное, то на микроуровне имеет место вращение микрообластей, способствующее очищению свариваемой поверхности. Данное явление наблюдается в случае больших пластических деформаций.

2. Обсуждение результатов. Согласно сказанному выше основой процесса образования соединения являются интенсивные течения металла с выбросом поверхностных частиц в зазор между пластинами, имеющие в тонких поверхностных слоях сталкивающихся пластин гидродинамический характер. Вышедшие на поверхность слои материала образуют соединение, в ближайшей окрестности которого наблюдаются следы локализации пластических деформаций, происходящих на глубине, достигающей нескольких десятков микрометров [10, 35].

Справедливость формулы (1), предложенной в [31] для расчета нижней границы области сварки (см. рис. 2), подтверждена экспериментально. Результаты экспериментов по сварке взрывом закаленных стальных пластин с использованием тонкой медной прослойки для генерирования потока медных частиц (см. подп. 1.1) показывают, что струеобразование является главным фактором, обеспечивающим очищение сталкивающихся поверхностей. Постановка эксперимента может рассматриваться как способ сваривания высокопрочных сталей и сплавов при низких скоростях соударения.

Возникновение струйного течения можно рассматривать как результат локализации деформации. Локализация деформации и характерные для нее существенные градиентные течения способствуют дополнительному очищению поверхности путем переноса остатков загрязняющих и окисных пленок вглубь материала.

Изложенная в [11, 12] концепция, согласно которой очищение происходит в результате воздействия на поверхность низкотемпературной плазмы, по мнению авторов данной

работы, является несостоятельной. Находящийся в зазоре нагретый ударной волной газ может оказывать влияние на процесс образования соединения при сварке листов больших размеров, например титана со сталью, для которых замена воздуха в сварочном зазоре инертным газом улучшает качество соединения [28]. Отрицательное влияние содержащегося кислорода воздуха объясняется возможностью воспламенения выбрасываемых в зазор частиц титана [39]. Однако не следует рассматривать влияние газа в качестве основного фактора, обуславливающего очищение поверхности. Доказательством этого является то, что сварка в вакууме происходит лучше, чем на воздухе [3].

Для образования соединения металлов достаточно привести чистые поверхности в физический контакт, при этом образуются связи, аналогичные связям между атомами в кристаллической решетке [13–16]. Процесс происходит за счет уменьшения свободной энергии системы вследствие уменьшения ее поверхности. В [40] представлены данные об изменении поверхностной энергии для различных пар чистых металлов при схватывании. Изменение поверхностной энергии при образовании соединения между металлом А и металлом В, характеризующее силу связи, вычисляется по формуле

$$\alpha_{AB} = -0,85(\alpha_A + \alpha_B) + \alpha_{chem}, \quad (3)$$

где α_A , α_B — поверхностные энергии соединяемых металлов; α_{chem} — слагаемое, обусловленное протекающими химическими реакциями. В случае металлов обычно отрицательный первый член в (3) по абсолютной величине значительно больше второго, который может быть как положительным, так и отрицательным. Поэтому величина α_{AB} всегда отрицательна, т. е. при схватывании происходит выделение энергии, и процесс самопроизвольного схватывания термодинамически оправдан. Значения α_{AB} для некоторых пар чистых металлов приведены в работе [40].

Закключение. Образование соединения металлических пластин при их высокоскоростном косом соударении обусловлено локализацией деформации в узкой зоне, примыкающей к контактной зоне, и наличием струйных течений. При этом возникновение струйного течения можно рассматривать как результат локализации деформации. Очищение поверхности пластин происходит в основном за счет струеобразования и является двойным: струя образуется из выносимых в зазор поверхностных высокоскоростных частиц, которые воздействуют на поверхность перед точкой контакта, очищая ее. Поэтому для соединения двух существенно различающихся по прочности материалов достаточно обеспечить интенсивные деформационные течения в одном из них, менее прочном. Это подтверждается тем, что расчет нижней границы области сварки можно проводить с использованием параметров менее прочного материала, а также результатами описанных выше экспериментов, в которых сварка закаленных стальных пластин обеспечивалась струйным потоком, генерируемым тонкой прослойкой из пластичной меди.

Локализация деформации с интенсивными градиентными течениями в области, примыкающей к зоне контакта, обеспечивает действие дополнительного механизма очищения — переноса поверхностных пленок вглубь материала за счет появления ротационных компонент деформации.

В случае когда поверхностные пленки отсутствуют, процесс схватывания по чистым поверхностям происходит самопроизвольно, поскольку это приводит к уменьшению энергии системы из двух свариваемых пластин.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дерibas А. А.** Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980.

2. **Дерibas А. А.** Метание металлических пластин тангенциальной детонационной волной // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 5. С. 68–74.
3. **Захаренко И. Д.** Сварка металлов взрывом. Минск: Навука і тэхніка, 1990.
4. **Лысак В. И.** Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. М.: Машиностроение-1, 2005.
5. **Яковлев И. В.** Сварка металлов взрывом: Аннот. библиогр. указ. отеч. и зарубеж. работ за 50 лет / И. В. Яковлев, В. В. Пай. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
6. **Казеев М. Н., Койдан В. С., Козлов В. Ф., Толстов Ю. С.** Исследование магнитно-импульсной сварки в плоской геометрии // ПМТФ. 2013. Т. 54, № 6. С. 38–44.
7. **Cowan G. R., Holtzman A. N.** Flow configurations in colliding plates: explosive bonding // J. Appl. Phys. 1963. V. 34, N 4, pt 1. P. 928–939.
8. **Кривенцов А. Н., Седых В. С.** О роли пластической деформации металла в зоне соединения при сварке взрывом // Физика и химия обраб. материалов. 1969. № 1. С. 132–141.
9. **Бондарь М. П., Оголихин В. М.** Пластическая деформация и образование связи при сварке взрывом медных пластин // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 1. С. 122–127.
10. **Бондарь М. П.** Тип локализации пластической деформации на контактах, определяющий образование связи // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 5. С. 122–128.
11. **Бондаренко С. Ю., Рихтер Д. В., Первухина О. Л., Первухин Л. Б.** Определение параметров ударно-сжатого газа в сварочном зазоре впереди точки контакта при плакировании взрывом // Автомат. сварка. 2009. № 11. С. 46–48.
12. **Pervukhin L. B., Pervukhina O. L., Bondarenko S. Yu., Agaurov Yu. S.** On interaction of shock-compressed gas and metallic surfaces in weld gap // Explosive production of new materials: science, technology, business, and innovations / Ed. by A. A. Deribas, Yu. B. Scheck. Cracow: Nokturn, 2014. P. 154–155.
13. **Gane N., Pfaelzer P. F., Tabor D.** Adhesion between clear surfaces at light loads // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1974. V. 340. P. 495–517.
14. **Johnson K. I., Keller D. V.** Effect of contamination on the adhesion of metallic couples in ultra-high vacuum // J. Appl. Phys. 1967. V. 38, N 4. P. 1896–1904.
15. **Nishikawa O., Rendulic K. D.** Some FIM observations on cold-welding of metals // Surface Sci. 1971. V. 26, N 2. P. 677–682.
16. **Merstallinger A., Sales M., Semerad E., Dunn B. D.** Assessment of cold welding between separable contact surfaces due to impact and fretting under vacuum. Noordwijk: ESA Comm. Product. Office, 2009.
17. **Красулин Ю. Л.** Взаимодействие металла с полупроводником в твердой фазе. М.: Наука, 1971.
18. **Семенов А. П.** Схватывание металлов и методы его предотвращения при трении // Трение и износ. 1980. Т. 1, № 2. С. 236–246.
19. **Каракозов Э. С.** Сварка металлов давлением. М.: Машиностроение, 1986.
20. **Кузнецов В. Д.** Физика резания и трения металлов и кристаллов: Избр. тр. М.: Наука, 1977.
21. **Крагельский И. В.** Трение и износ в вакууме / И. В. Крагельский, И. М. Любарский, А. А. Гусяков. М.: Машиностроение, 1973.
22. **Боуден Ф. П.** Трение и смазка / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. М.: Машгиз, 1960.
23. **Годунов С. К., Дерibas А. А., Мали В. И.** О влиянии вязкости материала на процесс образования струй при соударениях металлических пластин // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 16. С. 3–18.
24. **Кинеловский С. А., Тришин Ю. А.** Физические аспекты кумуляции // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 5. С. 26–40.

25. **Киселев С. П., Мали В. И.** Численное и экспериментальное моделирование образования струи при высокоскоростном косом соударении металлических пластин // *Физика горения и взрыва*. 2012. Т. 48, № 2. С. 100–112.
26. **Годунов С. К.** Моделирование ударно-волновых процессов в упругопластических материалах на различных (атомный, мезо- и термодинамический) структурных уровнях / С. К. Годунов, С. П. Киселев, И. М. Куликов, В. И. Мали. Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2014.
27. **Злобин Б. С.** Сварка взрывом стали с алюминием // *Физика горения и взрыва*. 2002. Т. 38, № 3. С. 137–140.
28. **Richter U., Roth J. F.** Grundlagen und Anwendung des Sprengplattierens // *Naturwissenschaften*. 1970. Н. 10. S. 487–493.
29. **Злобин Б. С., Киселев В. В., Гулидов А. И.** Исследование течения материалов в зазоре между соударяющимися пластинами // *Обработка материалов импульсными нагрузками*. Новосибирск: Спец. конструктор. бюро гидроимпульсной техники СО АН СССР, 1990. С. 216–224.
30. **Deribas A. A., Gulidov A. I., Zlobin B. S., et al.** On the oblique collisions of the metallic plates at extreme conditions // *Recent trends in high pressure research: Proc. of the 13th AIRAPT Intern. conf. on high pressure science and technology, Bangalore (India), 7–11 Oct. 1991*. Oxford: Oxford and IBH Publ. Co. Pvt. Ltd., 1992. P. 712–718.
31. **Дерibas А. А., Захаренко И. Д.** О поверхностных эффектах при косых соударениях металлических пластин // *Физика горения и взрыва*. 1974. Т. 10, № 3. С. 409–421.
32. **Zlobin B., Sil'vestrov V., Shtertser A., et al.** Enhancement of explosive welding possibilities by the use of emulsion explosive // *Arch. Metallurgy Mater.* 2014. V. 59, iss. 4. P. 1587–1592.
33. **Козин Н. С., Мали В. И., Рубцов М. В.** О тангенциальном разрыве при схлопывании биметаллической облицовки // *Физика горения и взрыва*. 1977. Т. 13, № 4. С. 619–625.
34. **Hammerschmidt M., Kreue H.** Microstructure and bonding mechanism in explosive welding // *Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals: Proc. of the Intern. conf., Albuquerque (USA), 22–26 June 1980*. N. Y.: Plenum Press, 1981. P. 961–973.
35. **Paul H., Litinska-Dobrynska L., Miszczyk M., Prazmovski M.** Microstructure and phase transitions near the bonding zone of Al/Cu clad manufactured by explosive welding // *Arch. Metallurgy Mater.* 2012. V. 57, iss. 4. P. 1151–1162.
36. **Рыбин В. В.** Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986.
37. **Штерцер А. А.** О ротационных компонентах деформации при динамических нагружениях металлических тел // *Физика горения и взрыва*. 1998. Т. 34, № 2. С. 129–133.
38. **Киселев С. П., Киселев В. П.** Численное моделирование процесса напыления наночастиц в методе ХГН // *Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и материалах: Докл. 5-й Всерос. конф., Новосибирск, 26–29 марта 2013 г.* Новосибирск: Параллель, 2013. Т. 1. С. 152–156.
39. **Бердыченко А. А., Злобин Б. С., Первухин Л. Б., Штерцер А. А.** О возможном возгорании выбрасываемых в зазор частиц при сварке титана взрывом // *Физика горения и взрыва*. 2003. Т. 39, № 2. С. 128–136.
40. **Oberg A., Martensson N., Schweitz J.-A.** Fundamental aspects of formation and stability of explosive welds // *Metallurg. Trans. A*. 1985. V. 16, iss. 5. P. 841–852.