



УДК 621.791.13

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ МАТЕРИАЛОВ ВЗРЫВОМ

Г. В. СМИРНОВ, д-р техн. наук, А. Д. ШУГАНОВ, Р. В. СТЕФАНОВИЧ, А. И. ЯДЕВИЧ, кандидаты техн. наук,
И. В. ПЕТРОВ, А. А. КОМОРНЫЙ, В. А. КОНОПЛЯНИК, А. Р. ЛУЧЕНОК, А. А. ТОЛОШНЫЙ,
П. Т. БОГДАНОВИЧ, О. А. ДЗИЧКОВСКИЙ, инженеры
(ОХП НИИ импульсных процессов, г. Минск, Беларусь)

Представлен обзор работ белорусских исследователей по теории сварки взрывом. Изложены физические представления, положенные в основу математической модели явления и продемонстрированы возможности численного моделирования процесса формирования соединения при дозвуковом косом соударении. Представлены простые полуэмпирические методы расчета и приведены примеры некоторых практических работ по сварке и обработке взрывом.

Ключевые слова: сварка взрывом, высокоскоростная деформация, удар, динамика

Использование энергии взрывчатых веществ (ВВ) и эффектов динамической кумуляции для создания новых и композиционных материалов по-прежнему является актуальным направлением исследований. Динамические методы перспективны при создании метастабильных структур с особыми свойствами или химическим составом, для соединения фаз, которые не могут быть получены традиционными методами, а также в связи с разработкой новых сверхпрочных композитов на основе нанокристаллических порошков тугоплавких химических соединений. Благодаря кратковременности процесса и высокоэнергетическому импульсному воздействию высоких давлений на вещество, приводящих к изменению субструктуры, фазовым превращениям, достигаются уникальные физико-механические характеристики материалов.

Работы в области динамики взрывных процессов, проводившиеся в БГНПО порошковой металлургии в последние годы, были направлены на развитие этих приоритетных направлений материаловедения. В известных работах О. В. Романа, П. А. Витязя, В. И. Беляева и др. дано феноменологическое количественное описание механизмов течения металла, эволюции сплошной и пористой среды при взрывном коллапсе, в условиях консолидации и сварки взрывом, ударной термомеханической обработки. Установлены критические параметры процессов и их взаимосвязь со структурой и свойствами материала. С помощью численного моделирования обоснованы технологические режимы и созданы методики инженерного расчета ударно-волнового импульсного нагружения материалов в условиях высокоскоростной деформации.

Расширение диапазона технологических режимов за счет применения техники высоких температур и новых схем кумуляции энергии в динамическом эксперименте позволило обобщить полученные результаты на случай сварки металлокерамических композиций. Способом сварки взрывом изготовлены и внедрены слоистые композиционные материалы на основе металлов с резко различающимися физико-механическими свойствами, в том числе на основе тугоплавких металлов и конструкционных материалов, а также порошковые композиционные материалы на основе сверхтвердых материалов. Актуальной научной и практической задачей является дальнейшая разработка важных прикладных проблем скоростного деформирования металлов, совершенствование экспериментальных методов исследования процессов сварки взрывом, ударной термомеханической обработки и консолидации при высоких технологических температурах и решение на этой основе задачи получения новых композиционных материалов методами высокоэнергетических импульсных технологий.

Специфика ударных взаимодействий. Сварку взрывом традиционно представляют как процесс соединения материалов в твердой фазе, происходящий при высокоскоростном косом соударении свариваемых заготовок. Проблема относится к разным аспектам металлофизики, но в первую очередь является задачей механики. Свидетельством этого является тот факт, что наибольшие успехи в развитии теории явления связаны с исследованиями многочисленной научной школы Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН.

Совершенствование методов взрывной обработки выдвинуло ряд новых задач, связанных с

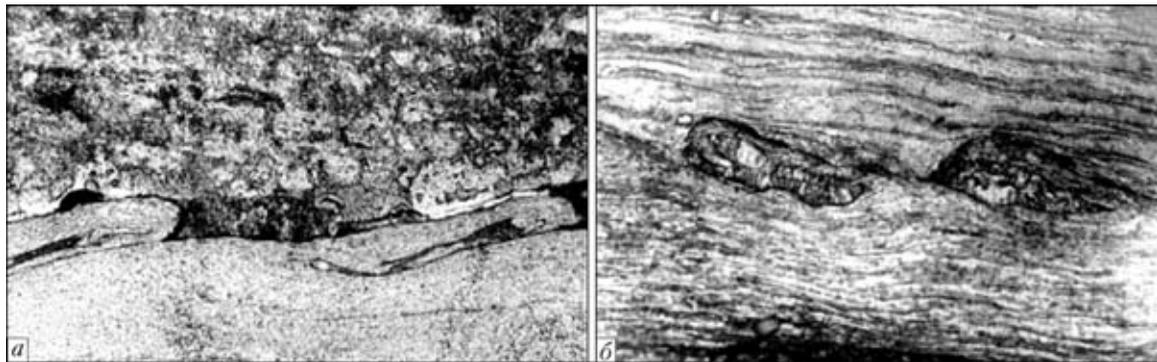


Рис. 1. Микроструктуры (X200) контактных зон при косом соударении пар тугоплавких металлов Mo–W (а), Ti–W (б)

моделированием и расчетом быстропротекающих процессов контактного взаимодействия и динамической кумуляции. Характерной особенностью сварки при высокоскоростном косом соударении является струеобразование и формирование волнообразной поверхности в контактной зоне. Диапазон параметров, в котором наблюдается это явление, как правило, совпадает с областью оптимальных режимов или близок к ним, поскольку при волнообразовании происходит самоочистление и активация свариваемых поверхностей, а тип соударения становится существенно неупругим. Значительная доля исходной кинетической энергии переходит не в энергию упругого сжатия, а в тепловую и в результате интенсивной пластической деформации контактных слоев, характерных даже для тугоплавких материалов (рис. 1), исключается образование при разгрузке растягивающих напряжений, способных разрушить соединение.

Известны попытки объяснить волнообразование при высокоскоростном косом соударении с позиций гидродинамики, вне связи с прочностными свойствами металлов и важными технологическими аспектами. С этой точки зрения не уда-

ется описать ограничения на эффект образования зародыша обратной струи при умеренных нагрузках, появление и неустойчивость которого, как доказано экспериментально, действительно является причиной образования волновой дорожки на границе раздела и условием самоочистления поверхности металлов.

Так, в работах [1–6] явление анализируется на основе модели несжимаемой жидкости и ассоциируется с разными формами гидродинамической неустойчивости. Условия формирования обратной струи перед линией контакта под чрезмерной нагрузкой стали понятны с позиций физики ударных волн и теории кумуляции, согласно которым обратная струя формируется в дозвуковой области течения за отходящими от зоны торможения потока косыми ударными волнами.

Последнее обстоятельство, понятное с позиций модели сжимаемой среды, а также простые практические соображения указывали на необходимость использования для сварки ВВ, скорость детонации которых заведомо меньше скорости звука в металлах. Однако давление детонации низкоскоростных ВВ существенно ниже бризантных и обнаружилось, что характер явления определяется прочностными характеристиками материалов, и, следовательно, следует строить модели, учитывающие их реальные прочностные свойства.

По мере накопления экспериментальных данных и их детального анализа, делались попытки установить критерии и построить основы теории процесса сварки взрывом [7–13]. Общим для многих из указанных работ явились четыре необходимых условия для определения оптимальных параметров сварки (рис. 2). Остановимся кратко на каждом из этих условий:

1) критические условия волнообразования, устанавливающие верхний предел интервала параметров, в котором наблюдается явление, строго определены лишь для однородных металлов в классических работах по кумуляции. Известные режимы струеобразования для разнородных металлов откорректированы на основании двумерных расчетов для пар, контрастных по свойствам материалов. Критический угол струеобразования

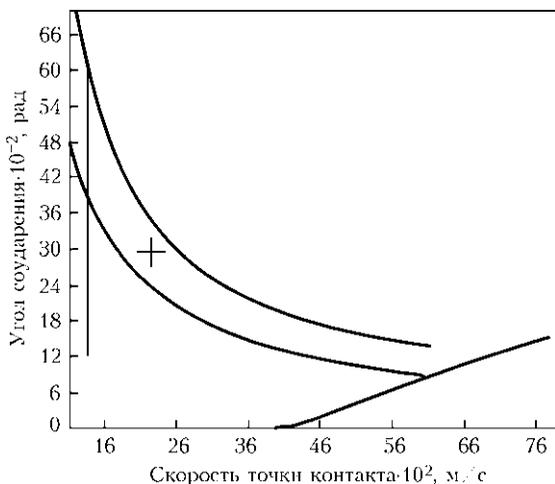


Рис. 2. Графическое изображение четырех условий, ограничивающих диапазон оптимальных параметров сварки для пары титан (Ti B265-GR2) — сталь (A516-70) толщиной 6 и 30 мм соответственно (результаты расчета по программе WMASTER)



определяет правую на рис. 2 границу скорости точки контакта, за которой, как отмечалось ранее, соударение происходит без образования кумулятивной струи и сварка невозможна. В этом случае оценку критического угла соударения γ^* для материалов, характеризующихся линейной зависимостью скорости ударной волны от массовой скорости, проводят следующим образом:

$$\theta = \varphi - \text{arctg} [\text{tg } \varphi - \text{tg } \varphi / s + c / (sV_k \cos \varphi)], \quad (1)$$

$$\varphi = \text{arcsin} [(-b - \sqrt{b^2 - 4ad}) / (2a)], \quad (2)$$

где $a = (1 - 2s)/s$; $b = (s - 2)c/(sV_k)$; $d = \frac{c^2}{sV_k^2} + 1$;

c, s — коэффициенты ударной адиабаты материала; φ — угол наклона ударной волны в материале с большей сжимаемостью; θ — угол поворота потока в ударной волне; $\gamma = \alpha + \beta$ — угол соударения, равный сумме установочного угла между пластинами и угла метания. Для однородных материалов

$$\gamma^* = 2\theta. \quad (3)$$

Точная форма этой границы имеет существенное значение лишь при сварке композиций с резко различающимися физико-механическими свойствами (например, титана и свинца), так как сварка производится при дозвуковой скорости точки контакта для материала с меньшей объемной сжимаемостью. В этом случае

$$\gamma^* = \frac{\rho_1 \delta_1 + \rho_2 \delta_2}{\rho_2 \delta_2} \theta, \quad (4)$$

где $\rho_{1,2}, \delta_{1,2}$ — плотности и толщины пластин;

2) минимальная скорость удара метаемой пластины должна быть достаточной, чтобы обеспечить пластическую деформацию материала перед линией контакта. Расчет напряжения при соударении производится, как правило, в соответствии с моделью упругого удара. Такая оценка, строго говоря, применима лишь в начальной стадии удара и дает завышенное значение напряжения течения. По этой причине Уитман и автор [7] приходят к выводу, что расчетное давление при соударении должно не менее чем в пять раз превосходить значение гюгониевского предела упругости.

Другая оценка напряжения течения в соответствии с моделью неупругого удара дает выражение для определения минимальной скорости удара и нижней границы сварки $v = V_k \gamma$ (рис. 2), полученное в работах [8, 10]:

$$v = \sqrt{\frac{2\sigma_y(\rho_1 \delta_1 + \rho_2 \delta_2)}{\rho_1 \rho_2 (\delta_1 + \delta_2)}}. \quad (5)$$

В качестве предела текучести предложено использовать не его техническое, а динамическое значение при заданной скорости деформации, давления и температуре;

3) по мнению ряда авторов, переход от безволновой структуры границы соединения к волновой должен происходить при строго определенной для каждой пары металлов скорости течения. Используя гидродинамическую модель, авторы [5] определили критическую скорость перехода в области относительно низких скоростей как переход от ламинарного течения к турбулентному. Уитманом [7] было предложено соотношение для определения скорости перехода:

$$V_k = \left[\frac{2\text{Re}(HV_1 + HV_2)}{\rho_1 + \rho_2} \right]^{1/2}, \quad (6)$$

где Re — число Рейнольдса, имеющее конкретное значение для данной пары материалов. Среднее значение этого параметра для ряда металлов равно 10,6, а при замене значений твердости по Виккерсу значениями гюгониевских пределов упругости, для всех металлов и сплавов $\text{Re} = 12,6 \pm 1,0$. Лучшее качество соединения, как утверждали авторы, достигается в том случае, когда скорость контакта лишь немного больше скорости перехода (на 50...200 м/с).

Эти и другие подобные исследования представляются важными, поскольку дают прямое указание на то, какая скорость детонации (т. е. тип ВВ), является оптимальной для соединения конкретной пары свариваемых материалов. Если скорость детонации D существенно превышает значение V_k , используют угловую схему сварки и угол установки

$$\alpha = \frac{v}{V_k} - \frac{v}{D}.$$

Однако обращает внимание тот факт, что соотношение (6), следующее из сравнения гидродинамического давления Бернулли в точке торможения потока с гюгониевским пределом текучести, по замыслу аналогично уравнению (5) с иной оценкой давления удара.

Позже отмечалось [10], что скорость перехода, предложенная Уитманом, связана со скоростью распространения нелинейной поверхностной волны в более жестком материале и резонансом с настигающей ее контактной нагрузкой

$$V_k \leq \frac{2\mu_2(1 - \nu_1) + 2\mu_1(1 - \nu_2)}{\mu_2(2 - \nu_1) + \mu_1(2 - \nu_2)} \max(\sqrt{\mu_1/\rho_1}, \sqrt{\mu_2/\rho_2}), \quad (7)$$

где μ_j, ν_j — модули сдвига и коэффициенты Пуассона материалов. Для случая контакта металла и жидкости имеем в пределе $V_k = 2/3\sqrt{\mu/\rho}$;



4) максимально допустимая скорость метаемой пластины устанавливает так называемую верхнюю границу сварки конкретной пары материалов. Разрушение связано с повышением температуры деформации и появлением оплавленных участков, которые не успевают застыть к моменту прихода волн разгрузки в зону соединения. Соотношение, определяющее взаимосвязь между максимальной скоростью удара и теплофизическими параметрами свариваемых материалов, предложено Уитманом и аналогичное И. Д. Захаренко [8, 12]:

$$v_{\max} = \frac{1}{N} \left(\frac{T_m c_V}{V_k} \right)^{0,5} \left(\frac{\zeta \chi c_V}{\rho_1 \delta_1 V_k} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

где N — константа приблизительно равная 0,1; T_m — температура плавления легкоплавкого материала; c_V — объемная скорость звука; ζ — теплопроводность; χ — удельная теплоемкость.

Для разнородных материалов в качестве параметров без индексов следует использовать значения для материала, который плавится первым.

Существенной деталью анализа Уитмана и др. является необоснованное утверждение о том, что на границе соединения всегда возникают растягивающие напряжения ударной разгрузки, а количество выделенного тепла в зоне соединения определяется фиксированной долей энергии удара. В этом случае при заданной критерием 2 требуемой скорости удара максимально допустимая скорость оказывается тем меньше, чем больше толщина метаемой пластины. Сварка пластин, толщина которых больше некоторого критического значения, оказывается невозможной, так как максимально допустимая скорость (7) меньше минимально необходимой (5). Отсутствие в приведенных формулах параметров, характеризующих теплоту плавления материала, возможных фазовых превращений и химических реакций, существенно снижает их ценность.

Тщательные расчеты показывают, что большая часть энергии деформации сосредоточена непосредственно в зоне деформации и тепловыделение в зоне сварного шва существенно превосходит принятую для расчета рассеянную энергию удара. Если допустить, что вся поглощенная энергия выделяется в зоне волнообразования, то оценка критической скорости течения, при которой возможно полное оплавление зоны, дает еще одно приблизительно постоянное ограничение скорости точки контакта, равное:

$$V_k = \sqrt{\frac{4\pi}{\omega} \frac{(\psi \rho_1 (\xi_1 + \chi_1 T_m) + \rho_2 (\xi_2 + \chi_2 T_m))}{(1 + \psi) (\rho_1 + \rho_2)}}, \quad (9)$$

где $\psi = \sqrt{\frac{\max(\rho_1, \rho_2)}{\min(\rho_1, \rho_2)}}$; $\xi_{1,2}$ — теплоты плавления материалов; ω — доля кинетической энергии, затраченной на волнообразование. Для однородных материалов

$$V_k = \sqrt{2\pi(\xi + \chi T_m)/\omega}. \quad (10)$$

Этот факт, отмеченный экспериментально Р. В. Стефановичем, определяется очевидной взаимозависимостью величины поглощенной деформационными процессами кинетической энергии и параметров (амплитудой и длиной) волнообразования:

$$a \sim \frac{\lambda}{2\psi}, \quad \lambda = 2\pi\delta_1 \frac{\rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \frac{\rho_2 \delta_2}{\rho_1 \delta_1 + \rho_2 \delta_2} \sin^2 \gamma. \quad (11)$$

Внутренняя область — область вероятной сварки. Однако следует отметить, что попытки ограничить зону свариваемости материалов линиями в координатах (γ, V_k) является следствием гидродинамического подхода к теории сварки и не вполне отражают суть явления.

К отмеченному следует добавить несколько замечаний о расчете динамических параметров процесса и параметров метания. Процесс детонации заряда ВВ описывается упрощенной моделью установившейся детонационной волны Чепмена–Жуге, которая принимает во внимание только состояние исходного ВВ и конечных продуктов реакции, в то время как ширина зоны реакции не учитывается. Решения уравнений газодинамики в совокупности с граничными и начальными условиями Чепмена–Жуге оказываются адекватными лишь при достаточно больших размерах заряда, когда ударную волну и область химической реакции можно рассматривать как разрыв. Примеры таких расчетов даны на рис. 3, 4 и подробно описаны в работах [6, 8, 13].

Для практических расчетов используют формулы, определяющие скорость или угол метания как функцию коэффициента нагрузки [3, 8], и формулы для оценки фазы разгона метаемой пластины, например:

$$v = 0,8D\sqrt{3R^2/(R^2 + 5R + 4)/(k^2 - 1)}, \quad (12)$$

$$D = D_{\max} (1 - x) (1 - e^{-H/H_{\min}})^{2(1-x)}, \quad (13)$$

$$h = \sqrt{R} H/5, \quad (14)$$

где R — отношение массы ВВ к массе метаемой пластины; k — экспериментальный показатель адиабаты продуктов взрыва; D_{\max} — предельная скорость детонации; H_{\min} — критический диаметр плоского заряда; x — доля инертной добавки. На расстоянии h (14) достигается 80 % максимальной

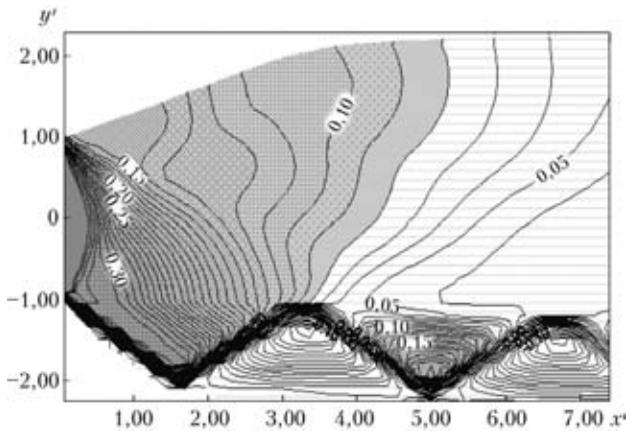


Рис. 3. Метание свинцовой пластины скользящей по ее поверхности детонационной волной $D = 4000$ м/с. Изобары течения за фронтом детонации [13]. Изобары течения в системе координат, связанной с фронтом детонации $x' = x/H/2$, $y' = y/H/2$, где H — величина заряда. Давление на изобарах отнесено к величине kP_D , где k — показатель адиабаты, $P_D = \rho_0 D^2 / (k + 1)$ — давление на фронте детонации

скорости, определяемой по известной формуле Гарни.

Динамика высокоскоростной деформации при сварке металлов взрывом. Допустим, что на всех стадиях рассматриваемого процесса справедливы уравнения динамики сплошной среды, выражающие законы сохранения массы, количества движения и энергии, а также дополнительные определяющие уравнения, которые конкретизируют выбор модели деформируемых сред, как-то связь между напряжениями и деформациями, уравнения состояния и т. п., а также начальные и граничные условия:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{F}(\mathbf{U}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \mathbf{G}(\mathbf{U}) + \frac{\partial}{\partial r} \mathbf{P}(\mathbf{U}) = 0, \quad (15)$$

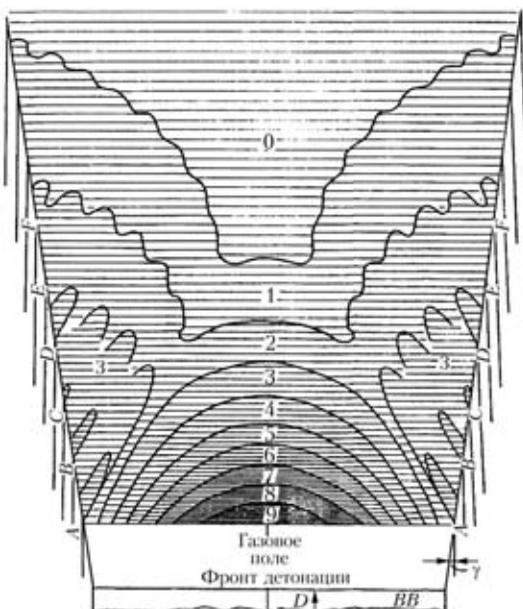


Рис. 4. Скачки давлений в продуктах детонации при метании пакетов пластин [8]

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 - S_{zz} \\ \rho v u - S_{rz} \\ u(E + p - S_{zz}) - v S_{rz} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$\mathbf{P}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ p - S_{\varphi\varphi} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho u v - S_{zr} \\ \rho v^2 - S_{rr} + S_{\varphi\varphi} \\ v(E + p - S_{rr}) - u S_{zr} \end{bmatrix},$$

где $p = p(\rho, I)$; $E = \rho I + \rho(u^2 + v^2)/2$.

Для металлов уравнение состояния использовали в виде

$$p = \sum_{i=0}^n k_i (1 - \rho_0/\rho)^i + \gamma \rho (I - I_0), \quad (17)$$

где k_i — постоянные экспериментальные параметры, $k_i = 0$, если $(1 - \rho_0/\rho) < 0$.

Напряжения и скорости деформаций связаны соотношениями Прандтля–Рейса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_{rr}}{\partial t} &= 2\mu \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \right) S_{zr} - \frac{\mu}{\eta} \varphi S_{rr}, \\ \frac{\partial S_{\varphi\varphi}}{\partial t} &= 2\mu \left(\frac{v}{r} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) \right) + \frac{\mu}{\eta} \varphi S_{\varphi\varphi}, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\frac{\partial S_{zz}}{\partial t} = 2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) \right) - \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \right) S_{rz} - \frac{\mu}{\eta} \varphi S_{zz},$$

$$\frac{\partial S_{rz}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \right) S_{rr} - S_{zz} - \frac{\mu}{\eta} \varphi S_{rz}$$

$$\varphi = \begin{cases} 1 - \frac{Y\sqrt{2}}{\sqrt{3(S_{zz}^2 + S_{rr}^2 + S_{\varphi\varphi}^2 + 2S_{zr}^2)}}, & \text{если } \sqrt{\frac{2}{3}} Y \leq (S_{ij} S_{ij})^{1/2}, \\ 0, & \text{если } \sqrt{\frac{2}{3}} Y > (S_{ij} S_{ij})^{1/2}, \end{cases}$$

где t — время; r, z — эйлеровы координаты (цилиндрическая симметрия); ρ — плотность; u, v — компоненты вектора скорости w (в направлении соответственно z и r); I — удельная внутренняя энергия; E — плотность полной энергии; p — давление; S_{ij} — девиатор напряжений, который определялся путем вычитания изотропной компоненты из полного тензора напряжений $\sigma_{ij} = (-p\delta_{ij} + S_{ij})$; Y — динамический предел текучести; μ — модуль сдвига; η — коэффициент вязкости.

Принимаем во внимание зависимость динамического предела текучести Y материала и модуля сдвига от интенсивности пластической деформации ε^p , давления, скорости деформации, плотности и температуры, например:



$$Y = Y_0(1 + \beta \varepsilon^p)^n [1 + bp(\rho_0/\rho)^{1/3} - h(T - 300)],$$

$$Y_0(1 + \beta \varepsilon^p)^n \leq Y_{\max}, \quad (19)$$

$$Y = 0, \text{ если } T \geq T_m, \quad (20)$$

$$T_m = T_{m0}(\rho_0/\rho)^{2/3} \exp[2\gamma_0(1 - \rho_0/\rho)], \quad (21)$$

$$\varepsilon^p = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\varepsilon_{rr}^p - \varepsilon_{zz}^p)^2 + (\varepsilon_{rr}^p - \varepsilon_{\varphi\varphi}^p)^2 + (\varepsilon_{zz}^p - \varepsilon_{\varphi\varphi}^p)^2 + 3/2(\varepsilon_{rz}^p)^2]^{1/2}, \quad (22)$$

$$\frac{d\varepsilon_{ik}^p}{dt} = \frac{\varphi}{2\eta} S_{ik}, \quad (23)$$

$$\eta = \eta_0 \exp(T_0/T), \quad (24)$$

$$\mu = \mu_0 [1 + bp(\rho_0/\rho)^{1/3} - h(T - 300)], \quad (25)$$

$$T = \frac{I - I_0}{3R}, \text{ где } I_0 = \sum_{j=0}^4 \varepsilon_{0j} (1 - \rho_0/\rho)^j. \quad (26)$$

Постоянные параметры $Y, \beta, b, h, Y_{\min}, T_{m0}, T_0, \eta_0$ в формулах (17)...(26) определены экспериментально для ряда металлов, например, для меди: $\rho_0 = 8,93, \gamma_0 = 1,99, k_1 = 1,386 \cdot 10^{12}, k_2 = 2,749 \cdot 10^{12}, k_3 = 5,113 \cdot 10^{12}, Y_0 = 1,2 \cdot 10^9, \beta = 36, n = 0,45, b = 3 \cdot 10^{-12}, h = 3,8 \cdot 10^{-4}, Y_{\max} = 6 \cdot 10^9, T_{m0} = 1790, \mu_0 = 4,77 \cdot 10^{11}, \eta_0 = 0,5, T_0 = 4380, \varepsilon_{00} = -1,178 \cdot 10^9, \varepsilon_{01} = -2,344 \cdot 10^9, \varepsilon_{02} = 7,529 \cdot 10^{10}, \varepsilon_{03} = 1,526 \cdot 10^{11}, \varepsilon_{04} = 2,19 \cdot 10^{11}, R = -\varepsilon_{00}/900.$

Для конкретизации вида определяющих соотношений при реализации численного эксперимента дополнительно используется информация о физических свойствах среды и ее структуре в форме кинетических соотношений для механизмов неупругой деформации и разрушения. При этом важны свойства скоростной чувствительности материалов, влияющие на процесс динамического поведения [8]. При отсутствии такой информации

используют подходы, основанные на термодинамических представлениях или косвенных экспериментальных данных.

Для взрывчатки на всех трех стадиях процесса детонации справедливы аналогичные уравнения динамики сплошной среды для многофазного многокомпонентного потока с химическими реакциями, выражающие законы сохранения массы, количества движения и энергии [13].

Для того чтобы добиться второго порядка точности как по времени, так и по пространству, при решении конечноразностных аналогов дифференциальных уравнений сохранения использован, в частности, метод предиктора-корректора. Для получения неосциллирующих течений дополнительно вводилась искусственная вязкость тензорного типа или механизм TVD диссипации Хартена. Это придавало методу стабильность и сохраняло его порядок точности.

В качестве примера на рис. 5–7 представлены результаты решения нестационарной задачи об инициировании детонации заряда аммонита толщиной 8 мм ударом стального ударника диаметром 3 мм, метании алюминиевой пластины толщиной 2,5 мм и соударении ее с аналогичной пластиной, отстоящей от первой на расстоянии 2,5 мм.

Изучено, в частности, формирование и поведение опережающих точку контакта нестационарных пластических волн. В зонах на рис. 5, ограниченных изолиниями максимального уровня второго инварианта девиатора напряжений, выполняется условие текучести, и материал находится в состоянии пластического течения. В области первоначально нормального контакта пластины с течением времени формируется дозвуковое движение и деформация поверхности. При несимметричном косом соударении зародыш струи по мере его роста под чрезмерно высоким давлением внедряется в накатывающийся металл своей вершиной, формирует прямой и обратный гребни, оставляя пустоты, где накапливаются поверхностные загрязнения и оксиды. Приведенные выше картины течения отражают динамику волновых фронтов при относительно жестких режимах соударения, когда возможны искажения формы волн и вихревых зон, обусловленные градиентом продольных составляющих скоростей метаемой и неподвижной пластин. Поскольку в вихревой волновой дорожке появляются полости, достижение условия полной прочности совпадает с условиями стабильного формирования умеренной ламинарной волны деформации. Лишь на развитых скоростных режимах течения геометрические размеры деформационных волн не зависят от скоростей точки контакта или скорости удара, и степень пластической деформации в очаге определяется исключительно углом соударения.

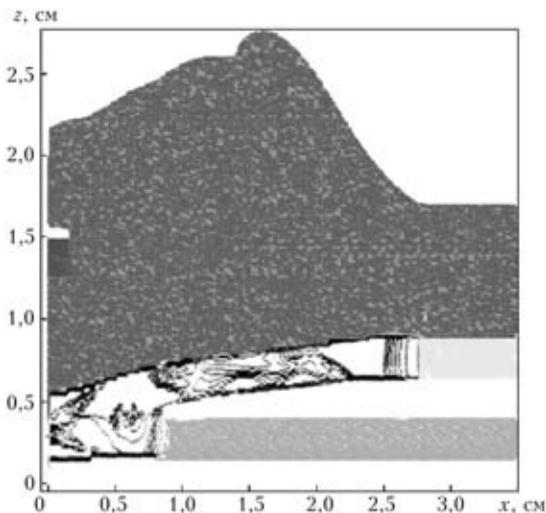


Рис. 5. Общая картина течения и изолинии второго инварианта девиатора напряжений (7,5 мкс)

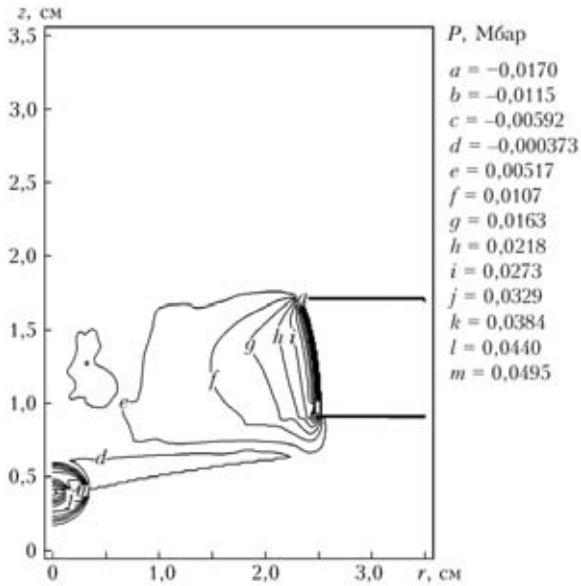


Рис. 6. Изабары при метании и соударении двух алюминиевых дисков толщиной 2,5 мм (6,5 мкс)

Параметрический анализ и систематизация результатов позволяют оценить напряжение течения и уточнить полуэмпирические критерии, приведенные выше, определяющие минимально необходимый для неупругого соударения вектор скорости удара (его модуль и направление), при котором пластические волны начинают опережать подвижный контакт и приводят к выдавливанию поверхностных слоев в направлении движения схлопывающихся металлических пластин. Переходные режимы течения от первоначально нормального сверхзвукового к дозвуковому по всем модам волн (упругой, пластической, поверхностной) (рис. 7) однозначно связываются с необходимыми условиями для сварки взрывом. Когда свариваемые металлы обладают равной или незначительно отличающейся прочностью, выражение типа (5) не противоречит экспериментальным данным. Однако при определении нижней гра-

ницы сварки несходных металлов, если они существенно отличаются по прочности (динамическому пределу текучести), возникает вопрос относительно того, прочность какого металла выбрать в уравнении типа (5). Численные расчеты, выполненные в рамках усложненной модели пластического течения, дают представление о том, как происходит возбуждение механизма волнообразования, связанного с пластической деформацией впереди точки контакта. Поочередное выдавливание и проникновение металлов перед точкой контакта с частотой V_K/λ мыслимо, если сопротивление внедрению струи периодически изменяется. Расчет подтверждает, что пределы текучести существенно изменяются уже в начальной стадии удара. Поток поверхностных слоев координируется скоростью деформации, параметры микроструй на умеренных режимах определяются скоростной зависимостью напряжения течения металлов. При этом динамический предел текучести является адекватной характеристикой сопротивления металла пластическому деформированию, поскольку процесс сопровождается очень

высокими скоростями деформации $\dot{\epsilon} = V_K/\lambda$ и его значение существенно превышает статическое. Несмотря на то что сопротивление металлов пластической деформации при высокой скорости деформации увеличивается, не удастся обосновать предположение о выравнивании динамических пределов текучести и приближении их к значениям теоретической прочности кристалла на сдвиг $\mu b/2\pi a$. Более существенным оказывается резкий рост температуры деформации. Проникающая способность микроструй при этом практически не зависит от характеристик прочности мягкого металла пары и определяется в большей степени пределом текучести твердого, как, например, в случае контрастной по свойствам пары титан-свинец, вольфрам-медь и т. п.

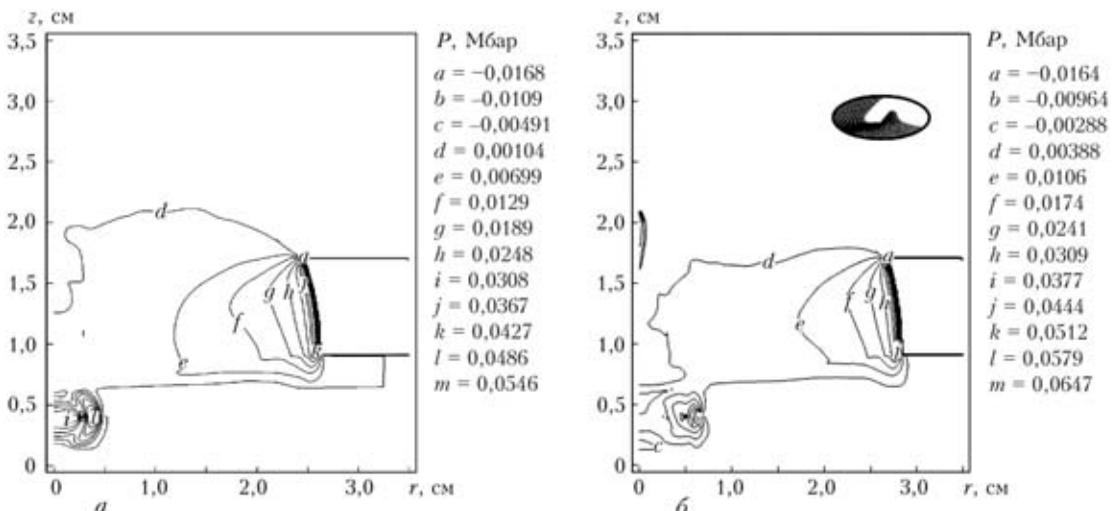


Рис. 7. Картины течения, соответствующие 7,00 (а) и 7,50 мкс (б) (выпучивания первого горба)



Таким образом, в диапазоне малых скоростей и углов соударения, близком к упругой зоне, когда деформации малы и температурная зависимость предела текучести еще не так заметна, напряжение течения определяется сжатием, деформацией его и скоростью деформации. В то же время на развитых режимах оно главным образом определяется вязким сопротивлением деформированию, которое достигает существенных значений, а значение удельной работы вязких сил того же порядка, что и теплота плавления.

Параметры кумуляции определяют долю энергии, рассеиваемой в зоне удара, и явления, связанные с верхней границей сварки. Анализ численного эксперимента показывает, что скорость струи при попеременном выдавливании ее из зоны соударения близка к скорости точки контакта, определяемой скоростью поверхностной пластической волны, а порции энергии пластической деформации на единицу ширины зоны, выбрасываемой за время цикла $1/V_k$, пропорциональны величине $\mu_i \lambda_i^2$ и соответственно удельная мощность $\sim \lambda \sqrt{\mu^3/\rho}$.

Независимость критического значения скорости перехода от угла соударения, как отмечалось выше, была установлена экспериментально. Дополнительная экспериментальная проверка критерия продолжена в опытах при повышенных технологических температурах по соударению пластин вольфрама, молибдена и меди, плакированной тонкими слоями титана, молибдена или железа, с нагревом либо одной метаемой (вольфрамовой пластины) либо обеими пластинами. При высокотемпературном нагреве выше температуры хрупкости тугоплавкой компоненты вплоть до температуры рекристаллизации твердость материала резко падала, как и значения, рассчитанные по критерию Уитмана, в то время как граница перехода и граница сварки изменялась не столь существенно (1300...1400 м/с для углов соударения в пределах от 10...15°). Это свидетельствует либо о высоком значении вязкости металлов либо об относительно высокой прочности решетки на сдвиг. Значение модуля сдвига металлов, которое падает в этом случае, не более чем на 20 %, лучше коррелирует с данными эксперимента. Постоянство скорости перехода, отмеченное Уитманом, Кованом и Хольцманом, связано с закономерностями распространения поверхностных упругих и пластических волн, особенности в поведении которых при скоростях, близких к скорости первой моды поверхностной волны, отмечались экспериментально А. И. Ядвичем.

Аналогичные процессы перераспределения энергии удара, нагрева поверхности частиц деформацией и схватывание (консолидация) происходят при прохождении достаточно мощной удар-

ной волны в порошковой или пористой среде. Численный анализ экспериментов по консолидации показал, что режим микрокумуляции в порах контакта частиц в первую очередь определяется скоростью потока за фронтом ударной волны, которая должна быть сравнима, как и при сварке взрывом, со скоростью волн сдвига. Плотность рассеиваемой энергии по контактам частиц в этом случае существенно зависит от ориентации частиц по отношению к фронту и массовой скорости потока за ударной волной. Мощность рассеивания пропорциональна $\delta \sqrt{\mu^3/\rho}$, где δ определяется размером частиц, их формой и ориентацией. Процесс импульсной сварки-консолидации при обработке высокомолекулярных соединений требует очень больших скоростей нагружения и соответственно давлений, недостижимых в условиях реального эксперимента. Как показывает расчет, небольшое время воздействия на частицы порошка не позволяет прогреть их гомогенно, что определяет разброс характеристик прочности компакта. В том случае, если микрокумуляция не может быть достигнута на ударном фронте, удовлетворяя упомянутым выше требованиям сварки, можно получить необходимую температуру и условия деформации методом горячего ударного прессования. Альтернативный холодному прессованию подход заключается в предварительной термической активации процесса для снижения критических значений скорости обработки.

Применение импульсных способов сварки и обработки. ГНПО порошковой металлургии с 1968 г. производит способом сварки взрывом биметаллы под последующую прокатку и сварку прокаткой. По признанию ведущих специалистов Беларусь производит наиболее широкую гамму биметаллов различного назначения. Эффективность использования новых изделий в промышленности, экономия дефицитных и дорогих материалов, электроэнергии обеспечиваются за счет сочетания в композитах разнородных материалов, обладающих комплексом требуемых свойств: коррозионной стойкостью, поверхностной твердостью, износостойкостью, стойкостью к удару, вязкостью, прочностью, теплопроводностью, коэффициентами термического расширения, электрическими и магнитными характеристиками (рис. 8).

Высокие служебные характеристики биметаллических плит на основе конструкционных материалов с плакировкой из титана, тантала, нержавеющей стали для сосудов атомной, химической и вакуумной техники позволяют использовать их в самых ответственных конструкциях при одновременном воздействии высокой температуры, пара, давления, химических реагентов и т. п. Плакирование взрывом эффективно при изготовлении трубных досок теплообменных аппаратов, тяжело нагруженных подшипников скольжения, акси-



Рис. 8. Материалы и изделия, полученные способом сварки и консолидации взрывом: *а* — переходники электролизеров медь–титан и алюминий–сталь повышенной термостойкости; *б* — панели из легких сплавов алюминия; *в* — теплообменники титан–медь, алюминий–титан; *г* — рабочие органы почвообрабатывающих машин; *д* — заготовки из циркониевой бронзы и молибдена; *е* — многослойные композиционные материалы; *ж* — заготовки коаксиально плунжерных насосов; *з, и* — композиционные изделия для микроэлектроники Cr, Ti–W, Ni–Cr–Si (*з*) и силициды Ti, W, Mo, Ta (*и*)



ально-поршневых насосов, биполярных электродов для гидрометаллургии, панелей из легких сплавов, ультразвуковых панелей, всевозможных переходников в сочетании более чем 300 пар разнородных металлов и сплавов, армированных композиционных материалов и многих других. Пакетная сварка металлов прокаткой в сочетании с плакированием взрывом расширяет технологические возможности метода и номенклатуру свариваемых материалов, снимает ограничения по максимальной толщине слоистых композиций.

В последние годы в объединении предложена и реализована на специальных установках обработка взрывом, включающая предварительный высокотемпературный нагрев и вакуумирование обрабатываемого материала, ударную сварку и последующую скоростную закалку. Расширение диапазона термодинамических состояний вещества позволило получить компакты и материалы из композиционных материалов и порошков, в том числе тугоплавких химических соединений с сильными ковалентными связями (нитридных, карбидных, боридных, силицидных). Развитие этих работ позволило сформировать новые направления исследований на длительную перспективу.

1. *Abrahamson G. R.* Residual periodical deformations of surface under action of moving jet // Proc. of ASME, Ser. E, Appl. Mechanics. — 1961. — 28, № 4. — P. 45–55.

The paper presents a review by Byelorussian researchers on the theory of explosion welding. Physical concepts, which are the basis of the mathematical model of this phenomenon, are described, and the capabilities of numerical simulation of the process of joint formation subsonic oblique collision. Simple semi-empirical methods of calculation are presented and examples of some practical work on explosion welding and treatment are given.

2. *Cowan G. R., Holtzman A. H.* Flow configurations in colliding plates: explosive banding // J. Appl. Phys. — 1963. — 34, № 4. — P. 928–939.
3. *Deribas A. A., Kudinov V. M., Matveenkov F. I.* Effect of initial parameters on process of wave formation during explosion welding of metals // Phys. of Combustion and Explosion. — 1967. — 3, № 4. — P. 561–568.
4. *Godunov S. K. et al.* Wave formation during explosion welding // J. Appl. Mechanics and Techn. Phys. — 1971. — № 3. — P. 63–73.
5. *Cowan G. R., Bergmann O. R., Holtzman A. H.* Mechanism of bond zone wave formation in explosionclad metals // Metallurg. Trans. — 1971. — 2, № 11. — P. 3145–3155.
6. *Дерибас А. А.* Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1972. — 188 с.
7. *Карпенгер С.* Сварка металлов взрывом. — Минск: Беларусь, 1976. — 43 с.
8. *Беляев В. И., Ковалевский В. И., Смирнов Г. В., Чекан В. А.* Высокоскоростная деформация металлов. — Минск: Наука и техника, 1976. — 224 с.
9. *Кудинов В. Д., Коротеев А. Я.* Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978. — 168 с.
10. *Ковалевский В. И., Беляев В. И., Смирнов Г. В.* Anwendungsmöglichkeiten des Explosionsschweißens für die Herstellung von Verbundmaterialien // Z. Metallkunde. — 1979. — 2.
11. *Захаренко И. Д.* Сварка металлов взрывом. — Минск: Наука и техника, 1990. — 205 с.
12. *Petushkov V. G., Simonov V. F., Sedykh V. S., Fadeenko Yu. I.* Explosion welding criteria. — Cambridge, 1996. — 127 p.
13. *Смирнов Г. В.* Эффекты динамической кумуляции. — Минск: Ремико, 1999. — 160 с.

Поступила в редакцию 18.06.2009

XIII РЕСПУБЛИКАНСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СВАРКА И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА»

Казахстан, Караганда, 10–11 декабря 2009 г.

10–11 декабря 2009 г. в Караганде состоится XIII Республиканская научно-техническая конференция «Сварка и контроль качества», которую проводят Карагандинский государственный технический университет и «Аттестационный центр по неразрушающему контролю».

На конференции будут рассматриваться вопросы теории и практики сварочного производства и неразрушающего контроля, а также подготовки кадров для этих сфер деятельности.

В рамках конференции пройдет совещание главных специалистов по вопросам подготовки и аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства в Казахстане.

Контакты:

тел. 8-7212-33-56-06; сот. 8-701-34-131-34;

тел./факс: 8-7212-72-17-41 «Аттестационный центр по неразрушающему контролю»;

E-mail: brodnikov@ngs.ru; brodnikov55@mail.ru (Бродников Владислав Михайлович);

igor_svar@mail.ru (Бартенев Игорь Анатольевич)