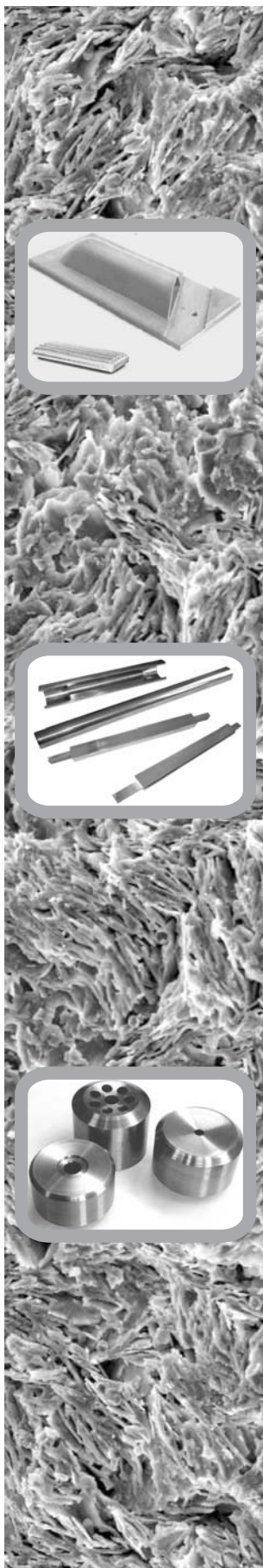


Глава 24

ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРИМЕНЕНИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

О.В. РОМАН, А.Д. ШУГАНОВ, Г.В. СМЕРНОВ



Технологии взрывной сварки металлов, консолидации нанокристаллических и ультрадисперсных порошков, ударной термомеханической обработки и упрочнения, динамического синтеза сверхтвердых материалов и тугоплавких химических соединений справедливо относят к числу перспективных методов получения новых и композиционных материалов. Пионерами этого направления исследований явились две группы белорусских ученых, созданных в 1961 году под руководством Романа О.В. и Беляева В.И. для изучения воздействия импульсных нагрузок на вещество. Исследования динамических свойств материалов при высоких давлениях и скоростях нагружения, в том числе, изучение поведения пористых гетерогенных структур при ударном воздействии первоначально начатые в связи с разработкой проблем неограниченной кумуляции и декаплинга, привели к открытию новых явлений микрокумуляции, аномального рассеивания энергии ударной волны, инициирования внутренних источников энерговыделения на межфазных границах, получивших впоследствии широкое практическое применение в процессах взрывной обработки и при получении новых материалов.

Работы в области динамики взрывных процессов, получившие развитие в Белорусском государственном объединении порошковой металлургии были направлены на развитие направлений, связанных с разработкой импульсных технологий получения металлокерамических композиций и имели целью создание гибкого интегрированного производства материалов с заранее заданными свойствами, как правило, сочетающих в себе, наряду с традиционными, преимущества технологий высоких параметров. Созданное в структуре объединения подразделение НИИ импульсных процессов с опытным производством ОП сегодня является головной организацией в Республике Беларусь в области техники и технологии импульсных процессов, основанной на применении взрывчатых веществ и пиротехнических материалов. Основными направлениями деятельности института являются: проведение фундаментальных научных исследований взрывных и импульсных процессов, изучение их воздействия на компактные и дискретные порошковые материалы при различных скоростях нагружения; разработка и внедрение новых технологических процессов, материалов и оборудования в области создания слоистых композиционных материалов с использованием высоких давлений и скоростей нагружения, конструкционной керамики, пористых и литых материалов различного назначения; выявление принципиально новых прикладных научных исследований по приоритетным направлениям импульсной обработки, разработка рекомендаций по использованию их на практике, сопровождение технологий при освоении в производстве.

Основу материально-технической базы института составляют созданные в районе Острошицкого городка производственные мощности, включающие в себя производственные и административно-бытовой корпуса, инженерные сети и защитные сооружения, участки сварки взрывом, гидродинамического прессования, штамповки, механической обработки, спекания, транспортный, деревообработки, ремонтно-механический и энергоучасток. Для производства взрывных работ на опытно-экспериментальном полигоне предусмотрены открытые взрывные площадки, помещения для подготовки зарядов, защитные укрытия для персонала, лабораторные помещения для размещения приборов и оборудования, а также взрывные камеры, средства измерения, дистанционного управления и наблюдения за процессами и т. п. На территории полигона располагается склад ВВ мощностью до 30 т взрывчатки.

Развитие института идет по пути наращивания объемов производства на базе расширения выпуска освоенной продукции и внедрения новых технологий и материалов. Динамические методы оказались перспективными при создании метастабильных структур с особыми свойствами или химическим составом, для соединения фаз, которые не могут быть получены традиционными методами, а также для синтеза и консолидации 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.

В известных работах Романа О.В., Витязя П.А., Беляева В.И. и учеников разработаны теоретические основы динамики высокоскоростного удара и моделирования задач механики деформируемого твердого тела, процессов сварки взрывом, взрывного компактирования, поведения продвинутых материалов при ударном воздействии, фокусировки ударных волн, разруше-

ния конструкций. Дано феноменологическое количественное описание механизмов течения металла, эволюции сплошной и пористой среды при взрывном коллапсе в условиях консолидации, 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, отличающиеся тем, что при расчете динамических параметров приняты во внимание реальная прочность, вязкость, теплопроводность, скоростная зависимость напряжения течения металлов, кинетика детонационного процесса, информация о физических свойствах среды и ее структуре в форме эволюционных соотношений для механизмов неупругой деформации и разрушения.

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. Разработаны технологии 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. Разработаны методики расчета, конструирования и технологии создания новых 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, решение на этой основе задачи получения композиционных материалов методами высокоэнергетических импульсных технологий. Приоритетными направлениями внедрения разработок института является эффективное использование энергии, развитие новых и высоких импульсных технологий и технологического оборудования, основанных на применении энергии взрыва, в частности, технологии получения новых слоистых материалов, наноматериалов, обеспечение надежности и безопасности технических систем, математическое-3D и физическое моделирование процессов и структур, разработка приборов для научных исследований, снижение расхода сырьевых и топливно-энергетических ресурсов, создание участков и перспективных производств, основанных на импульсных технологиях, повышение конкурентоспособности продукции машиностроения за счет применения новых материалов и технологий.

Ближайшая перспектива института связана с освоением серийного выпуска новой номенклатуры продукции на основе традиционных разработок института, завоеванием новых рынков в области:

- производства биметаллических и слоистых материалов различного назначения с повышенной коррозионной стойкостью, износостойкостью, стойкостью к удару, вязкостью разрушения, прочностью, теплопроводностью, электрическими и магнитными характеристиками; освоением производства крупногабаритных биметаллических листовых заготовок для производства специальных емкостей в химическом машиностроении, металлургической и атомной промышленности;

- разработки оборудования для промышленной утилизации боеприпасов на подведомственных объединению предприятиях; импортозамещающих технологий производства специальных изделий из конверсионных ВВ, взрывчатых материалов, специальных зарядов, пиротехнических средств, а также систем управления и контроля;

- техники и технологии горячей сварки взрывом композиционных материалов, получения композиционных и керамических материалов на основе тугоплавких и окси-карбидных соединений; детонационного синтеза алмазных порошков и сверхтвердых нанопорошков; синтеза и импульсной консолидации наноструктурных материалов; упрочнения и динамической обработки поверхностных слоев; получение многокомпонентных материалов мишеней повышенной степени чистоты с использованием импульсных методов нагружения;

- исследований магнитной кумуляции и разработки современных взрывомагнитных генераторов, энергетических и коммутационных элементов взрывомагнитных генераторов, термогенераторов на основе эффективных термоэлектрических материалов;

-разработки безопасных методов и средств взрывного демонтажа строительных конструкций, зданий и сооружений, проектирование микропроцессорных систем дистанционного контроля и управления взрывом распределенного в пространстве поля зарядов взрывчатого вещества с заданной задержкой по времени, 3D проектирование специальных видов взрывных работ.

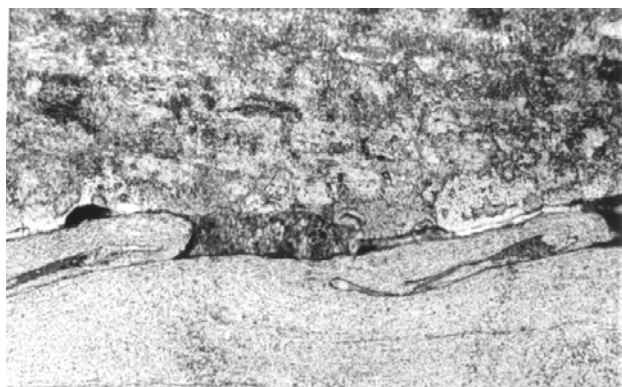
Эти разработки призваны стать надёжной основой для реконструкции существующей материально-технической базы института, позволят создать надёжный фундамент для решения главной задачи института – расширения и углубления фундаментальных и прикладных исследований в области физики высокоэнергетических процессов.

Ниже в ретроспективе представлен краткий обзор достижений белорусских исследователей.

1. Специфика ударных взаимодействий и сварка взрывом

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 этому является тот факт, что наибольшие успехи в развитии теории явления связаны с исследованиями многочисленных научных школ Института гидродинамики СО АН СССР.

Совершенствование методов взрывной обработки выдвинуло ряд новых задач, связанных с 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 самоочищение 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.



а ×200



б ×200

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

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 удастся 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 самоочищения поверхности металлов.

Так в ранних 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 взрывчатых веществ, скорость детонации которых заведомо меньше скорости звука в металлах. Но давление детонации низкоскоростных взрывчатых веществ (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 детального их 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 установлены 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 определяет правую на рис. 2 границу скорости точки контакта, за которой, как отмечалось ранее, соударение происходит без образования кумулятивной струи и сварка невозможна. Оценка величины критического угла соударения γ^* в этом случае для материалов, характеризующихся линейной зависимостью скорости ударной волны от массовой скорости проводят следующим образом:

$$\theta = \phi - \arctg[\operatorname{tg} \phi - \operatorname{tg} \phi / s + c / (s \cdot V_k \cdot c \cdot \cos \phi)], \quad (1.1)$$

$$\phi = \arcsin \left[\left(-b - \sqrt{b^2 - 4ad} \right) / (2a) \right], \quad (1.2)$$

где $a = (1 - 2s) / s$, $b = (s - 2)c / (sV_k)$, $d = \frac{c^2}{sV_k^2} + 1$, c и s - коэффициенты ударной адиабаты ма-

териала, 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

$$\gamma^* = 2 \cdot \theta. \quad (1.3)$$

Точная форма этой границы имеет существенное значения 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:

$$\gamma^* = \frac{\rho_1 \delta_1 + \rho_2 \delta_2}{\rho_2 \delta_2} \theta, \quad (1.4)$$

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 величины 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 величины напряжения течения. По этой причине Уиттман и автор [7] приходят к выводу, что расчетное давление при соударении должно в не менее чем в пять раз превосходить значение гюгониевского предела упругости.

Другая оценка величины напряжения течения в соответствии с моделью неупругого удара дает выражение для определения минимальной скорости удара (1.5) и нижней границы сварки $v = V_k \cdot \gamma$ (рис. 2), полученное Беляевым В.И. и сотр. [8,10]:

$$v = \sqrt{\frac{2\sigma_y(\rho_1\delta_1 + \rho_2\delta_2)}{\rho_1\rho_2(\delta_1 + \delta_2)}} \quad (1.5)$$

В качестве предела текучести предложено использовать не его техническое, а динамическое значение при заданной скорости деформации, давлении и температуре [14].

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. Уиттманом [7] было предложено соотношение для определения скорости перехода:

$$V_k = \left[\frac{2Re(H_{V_1} + H_{V_2})}{\rho_1 + \rho_2} \right]^{1/2}, \quad (1.6)$$

где Re - число Рейнольдса, имеющее конкретное значение для данной пары материалов. Среднее значение этой величины для ряда металлов равно 10,6. а при замене значений твердости по Виккерсу значениями гюгониевских пределов упругости, число Рейнольдса принимает почти постоянное значение для всех металлов и сплавов равное $12,6 \pm 1,0$. 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 взрывчатого вещества, является оптимальным 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 на себя внимание тот факт, что соотношение (1.6), следующее из сравнения гидродинамического давления Бернулли в точке торможения потока с гюгониевским пределом текучести, по замыслу аналогично уравнению (1.5) с иной оценкой величины давления удара.

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

$$V_k \leq \frac{2\mu_2(1-\nu_1) + 2\mu_1(1-\nu_2)}{\mu_2(2-\nu_1) + \mu_1(2-\nu_2)} \cdot \max(\sqrt{\mu_1/\rho_1}, \sqrt{\mu_2/\rho_2}), \quad (1.7)$$

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

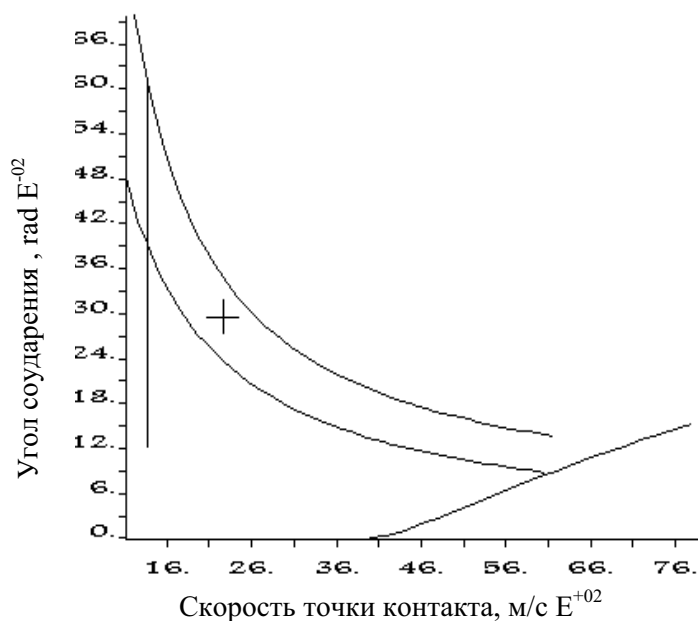


Рис.2. Графическое изображение четырех условий, ограничивающих диапазон оптимальных параметров сварки для пары титан (Ti B265-GR2) - сталь (Steel A516-70) толщиной 6 и 30 мм соответственно (результаты расчета по программе WMASTER)

4) Максимально допустимая скорость метаемой пластины устанавливает так называемую верхнюю границу сварки конкретной пары материалов. Разрушение связано с ростом 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 Уиттманом и аналогичное Захаренко [8, 12]:

$$v_{\max} = \frac{1}{N} \left(\frac{T_M \cdot c_V}{V_K} \right)^{0.5} \left(\frac{\zeta \cdot \chi \cdot c_V}{\rho_1 \cdot \delta_1 \cdot V_K} \right)^{0.25}, \quad (1.8)$$

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 Уиттмана 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, т.к. максимально допустимая скорость (1.7) оказывается меньше минимально необходимой (1.5). 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 в расчет величину рассеянной энергии 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:

$$V_k = \sqrt{\frac{4\pi}{\omega} \frac{(\psi \cdot \rho_1(\xi_1 + \chi_1 T_M) + \rho_2(\xi_2 + \chi_2 T_M))}{(1 + \psi)(\rho_1 + \rho_2)}}, \quad (1.9)$$

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:

$$V_k = \sqrt{2\pi(\xi + \chi T_M)/\omega}. \quad (1.10)$$

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

$$a \sim \frac{\lambda}{2\psi} \text{ и } \lambda = 2\pi\delta_1 \frac{\rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \cdot \frac{\rho_2\delta_2}{\rho_1\delta_1 + \rho_2\delta_2} \sin^2 \gamma \quad (1.11)$$

Четыре перечисленных выше граничных условия представлены схематически на рис. 2. Внутренняя область - область вероятной сварки. Следует, однако, 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 сказанному 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 Ч-Ж 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].

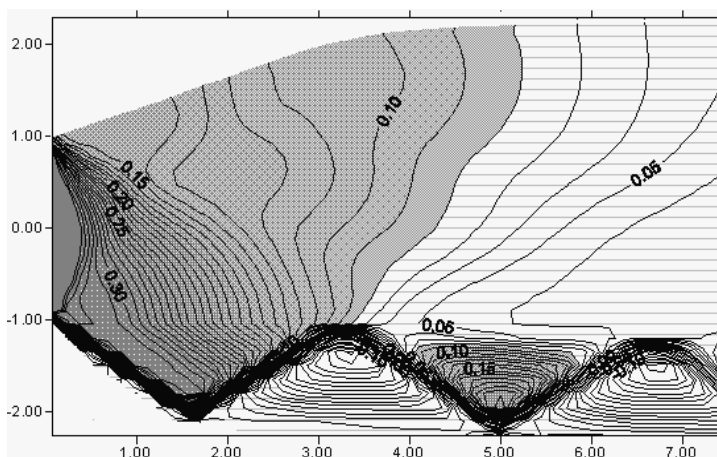


Рис. 3. Метание свинцовой пластины скользящей по ее поверхности детонационной волной $D=4000$ м/с. [13]. Изобары течения в системе координат связанной с фронтом детонации $x'=x/H/2, y'=y/H/2$, где H величина заряда. Давление на изобарах отнесено к величине kP_D , где k - показатель адиабаты, $P_D = \rho_0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

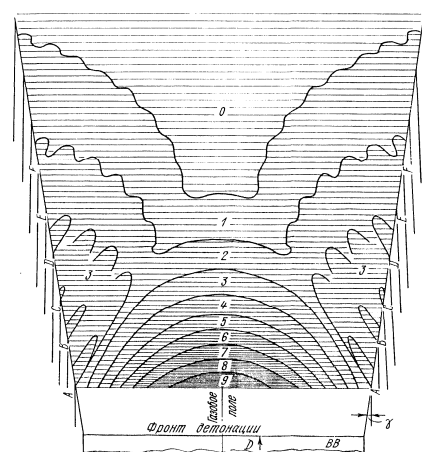


Рис.4. Скачки давления в продуктах детонации при метании пакетов пластин [8]

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

$$v = 0.8 \cdot D \cdot \sqrt{3R^2 / (R^2 + 5R + 4) / (k^2 - 1)}, \quad (1.12)$$

$$D = D_{\max} \cdot (1-x) \left(1 - e^{-\frac{H}{H_{\min}}}\right)^{2 \cdot (1-x)}, \quad (1.13)$$

$$h = \sqrt{R} \cdot H / 5, \quad (1.14)$$

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 (1.12) достигается 80% максимальной скорости, определяемой по известной формуле Гарни.

2. Динамика высокоскоростной деформации при сварке металлов взрывом

Допускаем, что на всех стадиях рассматриваемого процесса справедливы уравнения динамики сплошной среды, выражающие законы сохранения массы, количества движения и энергии, дополнительные определяющие уравнения, конкретизирующие выбор модели деформируемых сред, как-то связь между напряжениями и деформациями, уравнения состояния и т.п., а также начальные и граничные условия:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{F}(\mathbf{U}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \mathbf{G}(\mathbf{U}) + \frac{\partial}{\partial r} \mathbf{P}(\mathbf{U}) = 0; \quad (2.1)$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E \end{bmatrix}, \mathbf{F}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 - S_{zz} \\ \rho u v - S_{rz} \\ u(E + p - S_{zz}) - v S_{rz} \end{bmatrix}, \mathbf{P}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ p - S_{\phi\phi} \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{G}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho u v - S_{zr} \\ \rho v^2 - S_{rr} + S_{\phi\phi} \\ v(E + p - S_{rr}) - u S_{zr} \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

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

Для металлов уравнение состояния использовалось в виде:

$$p = \sum_{i=0}^n k_i (1 - \rho_0 / \rho)^i + \gamma \rho (I - I_0), \quad (2.3)$$

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

Напряжения и скорости деформаций связаны соотношениями Прандтля-Рейса:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial S_{rr}}{\partial t} &= 2\mu \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \right) S_{rz} - \frac{\mu}{\eta} \phi S_{rr}; \\
\frac{\partial S_{\phi\phi}}{\partial t} &= 2\mu \cdot \left(\frac{v}{r} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) \right) + \frac{\mu}{\eta} \phi S_{\phi\phi}; \\
\frac{\partial S_{zz}}{\partial t} &= 2\mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) \right) - \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \right) S_{rz} - \frac{\mu}{\eta} \phi S_{zz}; \\
\frac{\partial S_{rz}}{\partial t} &= \mu \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \right) (S_{rr} - S_{zz}) - \frac{\mu}{\eta} \phi S_{rz}, \\
\phi &= \begin{cases} 1 - \frac{Y\sqrt{2}}{\sqrt{3(S_{zz}^2 + S_{rr}^2 + S_{\phi\phi}^2 + 2S_{rz}^2)}} \dots \text{if} \dots \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot Y \leq (S_{ij} S_{ij})^{1/2}; \\ 0 \quad \cdot \text{if} \dots \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot Y > (S_{ij} S_{ij})^{1/2}. \end{cases}
\end{aligned} \tag{2.4}$$

В этих уравнениях t - время, r, z - эйлеровы координаты (цилиндрическая симметрия), ρ - плотность; u, v - компоненты вектора скорости w (в направлении z и r соответственно); I - удельная внутренняя энергия; E - плотность полной энергии; p - давление и 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 μ от интенсивности пластической деформации ε^p , давления, скорости деформации, плотности и температуры, например, модель Стейнберга - Гуинана (Steinberg-Guinan):

$$Y = Y_0(1 + \beta \varepsilon^p)^n [1 + b p(\rho_0 / \rho)^{1/3} - h(T - 300)]; \tag{2.5}$$

$$\begin{aligned}
Y_0(1 + \beta \varepsilon^p)^n &\leq Y_{\max}; \\
Y &= 0 \quad \text{если } T \geq T_m;
\end{aligned} \tag{2.6}$$

$$T_m = T_{m0}(\rho_0 / \rho)^{2/3} \exp[2\gamma_0(1 - \rho_0 / \rho)]; \tag{2.7}$$

$$\varepsilon^p = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\varepsilon_{rr}^p - \varepsilon_{zz}^p)^2 + (\varepsilon_{rr}^p - \varepsilon_{\phi\phi}^p)^2 + (\varepsilon_{zz}^p - \varepsilon_{\phi\phi}^p)^2 + 3/2(\varepsilon_{rz}^p)^2]^{1/2}; \tag{2.8}$$

$$\frac{d\varepsilon_{ik}^p}{dt} = \frac{\phi}{2\eta} S_{ik}; \tag{2.9}$$

$$\eta = \eta_0 \exp(T_0 / T); \tag{2.10}$$

$$\mu = \mu_0 [1 + b p(\rho_0 / \rho)^{1/3} - h(T - 300)]; \quad (2.11)$$

$$T = \frac{I - I_0}{3R} \quad \text{где} \quad I_0 = \sum_{j=0}^4 \varepsilon_{0j} (1 - \rho_0 / \rho)^j. \quad (2.12)$$

Постоянные параметры $Y, \beta, b, h, Y_{\min}, T_{m0}, T_0, \eta_0$ в формулах 2.3-2.12 определены экспериментально для ряда металлов, например, для меди:

$\rho_0 = 8.93, \gamma_0 = 1.99, k_1 = 1.386 \cdot 10^{12}, k_2 = 2.749 \cdot 10^{12}, k_3 = 5.113 \cdot 10^{12}, Y_0 = 1.2 \cdot 10^9, \beta = 36, n = 0.45, b = 3 \cdot 10^{-12}, h = 3.8 \cdot 10^{-4}, Y_{\max} = 6 \cdot 10^9, T_{m0} = 1790, \mu_0 = .77 \cdot 10^{11}, \eta_0 = .05, T_0 = 4380, \varepsilon_{00} = -1.178 \cdot 10^9, \varepsilon_{01} = -2.344 \cdot 10^9, \varepsilon_{02} = 7.529 \cdot 10^{10}, \varepsilon_{03} = 1.526 \cdot 10^{11}, \varepsilon_{04} = 2.19 \cdot 10^{11}, R = -\varepsilon_{00} / 900.$

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 важными являются свойства скоростной чувствительности материалов, влияющие на процесс динамического поведения [8]. При отсутствии такой информации используются 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 конечно-разностных 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.

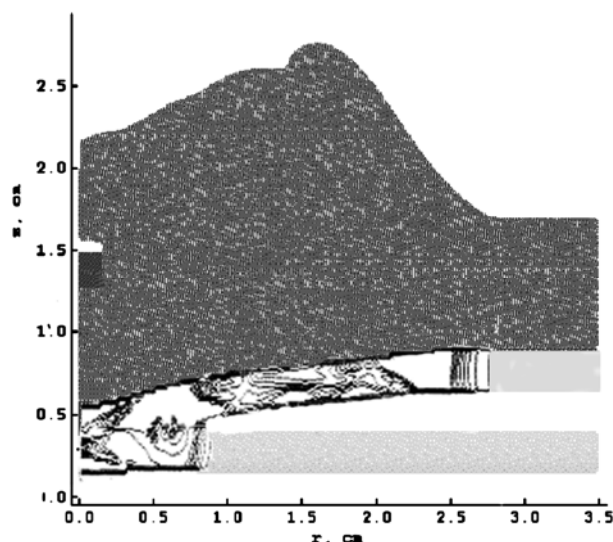


Рис. 5. Общая картина течения и изолинии второго инварианта девиатора напряжений (7.5 мкс)

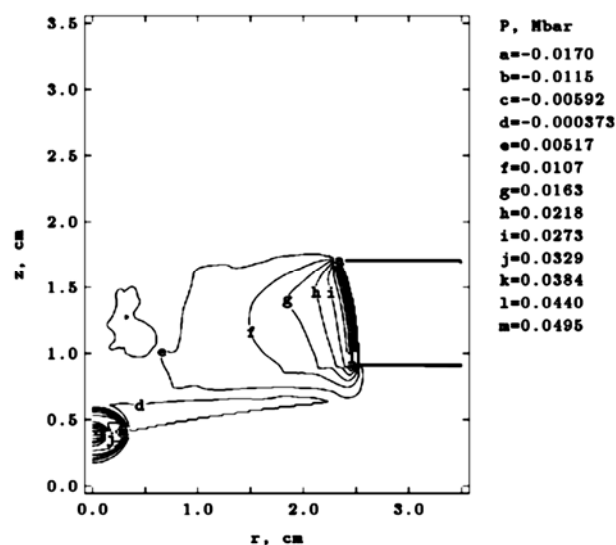


Рис.6. Изобары при метании и соударении двух алюминиевых дисков толщиной 2,5 мм. (6.5 мкс)

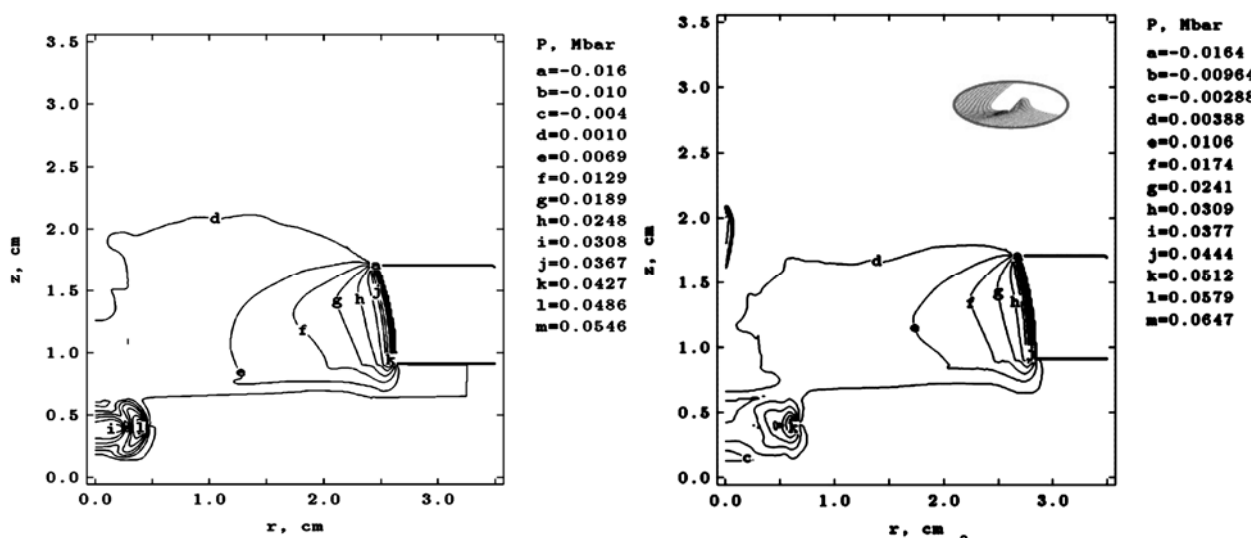


Рис. 7. Картины течения, соответствующие 7,00 и 7,50 мкс (выпучивания первого горба)

Изучалось, 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 пластин 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 окислы. 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.

Параметрический анализ и систематизация результатов позволяют оценить величину напряжения 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 (1.5) не противоречит экспериментальным данным. Однако при определении нижней границы сварки несходных металлов, если они существенно отличаются по прочности (динамическому пределу текучести), возникает вопрос относительно того, прочность какого металла выбрать в уравнение типа (1.5). 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 координи-

руется скоростью деформации, и параметры микроструй на умеренных режимах определяются скоростной зависимостью напряжения течения металлов. Динамический предел текучести является при этом адекватной характеристикой сопротивления металла пластическому деформированию, поскольку процесс сопровождается очень высокими скоростями деформации $\dot{\epsilon} = V_k / \lambda$ и его величина существенно превышает статическое значение. 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.

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, величиной деформации и скоростью деформации. В то же время на развитых режимах оно определяется главным образом вязким сопротивлением деформированию, которое достигает существенных значений, а удельная работа вязких сил имеет тот же порядок величины, 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 λ / V_k , пропорциональны величине $\mu_i \lambda_i^2$, и соответственно удельная мощность $\lambda \sqrt{\mu^3 / \rho}$.

Независимость критического значения скорости перехода от угла соударения как отмечалось выше была установлена экспериментально. Дополнительная экспериментальная проверка критерия была 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 обеих пластин. При высокотемпературном нагреве выше температуры хрупкости тугоплавкой компоненты вплоть до температуры рекристаллизации твердость материала резко падала, как и значения, рассчитанные по критерию Уиттмана, 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 градусов). 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 Уиттманом, 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 Ядевичем А.И.

Аналогичные процессы перераспределения энергии удара, нагрева поверхности частиц деформацией и схватывание (консолидация) происходят при прохождении достаточно мощной ударной волны в порошковой или пористой среде. Численный анализ экспериментов по консолидации показал, что режим микрокумуляции в порах контакта частиц определяется в первую очередь скоростью потока за фронтом ударной волны, которая должна быть сравнима, как и при сварке взрывом, с величиной скорости 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 величина δ определяется размером частиц, ее 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 вышеупомянутым требованиям сварки, возможно получить необходимую температуру и условия деформации методом горячего ударного прессования (HSC). Альтернативный холодному прессованию подход заключается в предварительной термической активации процесса для снижения критических значений скорости обработки.

3. Импульсное компактирование порошковых материалов

Коммерческий интерес к высококачественной керамике, используемой, в частности, при изготовлении броневых и инструментальных, инициировал возрастающее внимание к технологии взрывного прессования и консолидации, как перспективному методу обработки таких материалов. Процесс динамического уплотнения порошков развивался параллельно с технологией сварки взрывом. В настоящее время он используется, главным образом, при получении материалов и изделий специального назначения из труднопрессуемых и нанокристаллических порошков сверхтвёрдых материалов.

Представляет интерес сравнить условия и критерии для получения соединения между частицами при уплотнении порошка и сварке взрывом. Сварочные режимы, как правило, описываются в координатах «угол соударения – скорость точки контакта» в то время как для прессования невозможно представить такое количественное описание, т.к. на первый взгляд нет никаких стационарных режимов столкновения частиц и в большинстве случаев соударений как таковых. Волновое взаимодействие характерное для процесса сварки взрывом редко наблюдается при деформации порошков на квазистатических режимах. Квазистатическая деформация не приводит к соединению между частицами и используется для уплотнения под последующее спекание. Вместе с тем внимательный анализ показывает, что общим для обоих процессов является микрокумуляция в зоне локальной деформации и как следствие высокая температура на контактах. Монолитные образцы могут быть получены только в развитом динамическом режиме деформации частиц. Ниже рассмотрены основные подходы при оценке режимов динамической консолидации.

Качество соединения между частицами, инициирование фазовых переходов, и химических реакций определяются такими явлениями как локализации деформации и формирования горячих пятен на поверхности частицы, протекания химико-термических процессов на границах раздела, закалки и т.п. В настоящее время существует лишь качественная характеристика взаимосвязи между этими явлениями, позволяющая оценить конечные свойства компакта и установить потенциальные возможности метода в каждом конкретном случае. Дальнейший прогресс в этой области связан с описанием динамики деформации порошков, и условий обеспечивающие схватывание между частицами.

Модель одиночной поры [16,18] при исследовании поведения пористого материала дает возможность получить динамическое уравнение уплотнения материала и предсказывает изменение при переходе от низкого давления к высоким. Она находится в качественном согласии с экспериментом для медного порошка при давлении от 1 до 10 ГПа при нормальной начальной температуре. Учет температурных эффектов в этой модели (тепловой зависимость предела текучести и вязкости) показал существование двух качественно различных режимов деформаций порошка приводящих впоследствии к различным конечным структурам уплотненного материала. Увеличение амплитуды давления или первоначального предварительного нагрева приводит к переходу в диапазон, где инерциальный эффект доминирует над процессом уплотнения и развиваются турбулентные потоки.

Вслед за Бенсоном [30,31] нами разработан двумерный компьютерный алгоритм, который способен анализировать эти проблемы. Результаты такого подхода продемонстрировали качественное совпадение с экспериментом на металлических порошках. Чтобы моделировать параметры ударно-волновой обработки, распределение частиц по размерам и разнородные по физико-механическим свойствам материалы, используется обобщенный вычислительный метод, учитывающий разнообразные динамические эффекты, включая температурную и скоростную зависимость напряжения течения, большие пластические деформации, разрушение, фазовые переходы. Основные уравнения нестационарной задачи об инициировании детонации, ме-

тании, соударении и микрокумуляции в форме законов сохранения массы, энергии, импульса и определяющих соотношений упруговязкопластического течения были рассмотрены ранее. Используется двумерная схема, требующая меньшего объема оперативной памяти компьютера. Частицы порошка моделируются регулярно или случайно упакованными тороидами. Осевая симметрия выбрана для оценки кумулятивных эффектов сходящихся к оси течений при нагружении цилиндрической ампулы сохранения а также более детального анализа динамики соударения сферических ударников с преградой. Порошковые частицы заданного распределения по размерам и средней начальной пористости заполняют лишь часть расчетной области. Дефект укладки моделируется с помощью метода Монте Карло. Средняя частица заполняет 10 ячеек, так что изменение формы частицы описывается удовлетворительно. Расчетная область содержащая многокомпонентную среду разбивается сеткой на ячейки, часть из которых не занятых средой может быть пустыми. Допускается течение материала через границы расчетной эйлеровой сетки, с произвольными большими деформациями, которые вычисляются без больших проблем, так что численное моделирование деформации частиц автоматически принимает во внимание процесс схлопывание пустот и кумулятивные эффекты струеобразования.

Значения термодинамических величин в произвольной точке расчетной области соответствуют центрам ячеек, а значения скоростей приписываются границам. На первом этапе расчета вычисляется вклад в производные по времени за счет давления, а конвективные члены в уравнениях опускаются. В каждой ячейке в первом приближении вычисляются значения скорости и внутренней энергии. Затем включаются конвективные члены с учетом рассчитанных значений скоростей в ячейках и вещество, пересекающее границы ячеек, переносит соответствующие доли массы, импульса и энергии. Подпрограммы расчета параметров по уравнениям состояния содержат в качестве входных величин удельный объем, внутреннюю энергию и массовые доли компонентов. В результате итерирования они выдают давление, индивидуальные плотности, температуры и энергии компонентов. Если в ячейке имеются два компонента, разделенные границей и не образующие однородную смесь, то предполагается наличие равновесия по давлению, а температуры компонентов могут быть различными. В случае, когда оба компонента твердые вещества или жидкости, предполагается, что разница между полной энергией, определенной по адиабате Гюгонио, и полной энергией ячейки распределена в соответствии с отношением энергий, определенных по адиабатам Гюгонио для каждого компонента. В случае двух газовых компонентов предполагается, что разница между полной энергией, определенной по изэнтропе, и полной энергией ячейки распределена между компонентами в соответствии с отношением энергий, определенных по изэнтропам для каждого компонента. В случае, когда один компонент-твердое вещество, а другой газ, предполагается, что разница между суммой двух энергий энергии газа, определенной по изэнтропе, и энергии твердого вещества, определенной по адиабате Гюгонио, и полной энергией ячейки распределяется между компонентами в соответствии с отношением энергии газа, определенной по изэнтропе, к энергии твердого вещества, определенной по адиабате Гюгонио. Если в ячейке содержатся три компонента, то при получении уравнения состояния предполагается равновесие по давлению и температуре для конденсированного вещества и газа и равновесие по давлению для нереагирующего компонента и т.д. Производится расчет реакций и превращений по уравнениям кинетики и по уравнениям состояния вычисляются полные давления в ячейках. Численный анализ принимает во внимание трение между частицами, которые ведут к дополнительному локальному разогреву контактов в особенности на низких скоростях. Для моделирования использовался код GAMMA [15]. Объемное сжатие описывается наряду с уравнением Грюнайзена уравнениями состояния, которые принимают во внимание фазовые превращения. Процесс динамической консолидации, как отмечалось ранее, характеризуется важными особенностями, влияющими на скорость фазовых превращений.

Численный анализ экспериментов по консолидации показал, что режим микрокумуляции в зоне контакта частиц определяется в первую очередь скоростью потока за фронтом ударной волны, которая должна быть сравнима, как и при сварке взрывом, с величиной скорости волн сдвига. Плотность рассеиваемой энергии в этом случае существенно зависит от ориентации частицы по отношению к фронту и массовой скорости потока за ударной волной. Мощность рассеивания пропорциональна $\delta \sqrt{\mu^3 / \rho}$, где величина δ определяется главным образом разме-

ром частиц, ее формой и ориентацией. Таким образом, процесс импульсной сварки-консолидации при обработке высокомолекулярных соединений требует очень больших скоростей нагружения и, соответственно, давлений, зачастую 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.

Альтернативный подход заключается в предварительной термической активации процесса для снижения критических значений скорости. В том случае, если микрокумуляция не может быть достигнута на ударном фронте, удовлетворяя вышеупомянутым требованиям, возможно получить необходимую температуру на поверхности и в центре частиц методом горячего ударного прессования (HSC). Таким образом, моделирование позволяет оптимизировать условия удара и в зависимости от желаемой цели получить уплотнение, сварку частиц или синтез новых фаз.

Ударное сжатие пористых или гетерофазных веществ сопровождается возникновением горячих точек. В связи с этим особый интерес представляют метастабильные состояния, когда вещество перегрето выше температуры перехода без полного разрушения его прежней структуры. Для веществ с высоким динамическим пределом прочности температура горячих точек выше, а вероятность образования метастабильных аморфных фаз определяется теплопроводностью материала. При наличии в гетерогенной смеси компонентов с высокой теплопроводностью можно получить материал с уникальными свойствами и зафиксировать фазы, через область стабильности которых ударная адиабата не проходит, но локальное повышение температуры ее захватывает. Если создать условия для быстрой кристаллизации материала в состоянии после разгрузки, находящимся в области динамического гистерезиса, то после такой ударной обработки вещество можно частично обратить в новую фазу. В этом случае наблюдается мелкокристаллическая структура из-за кратковременности диффузионных процессов. При использовании ампульных высокотемпературных схем с принудительным охлаждением стенок ампул, выполняемых из подходящих материалов можно обеспечить условия сверхбыстрой закалки фаз высокого давления, например алмаза. Некоторые аспекты технологии и безопасности применяемого в БГНПК порошковой металлургии оборудования для реализации процесса взрывной импульсной высокотемпературной вакуумной сварки или упрочняющей термомеханической обработки композиционных алмазосодержащих материалов, в том числе для сварки поликристаллических алмазов приведены в [15].

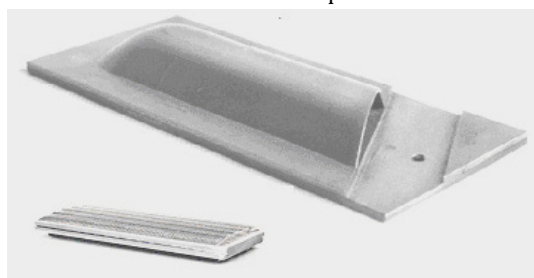
4. Применение импульсных методов сварки и обработки взрывом

ГНПО порошковой металлургии с 1968 года производит методом 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 стойкости, поверхностной твердости, износостойкости, стойкости к удару, вязкости, прочности, теплопроводности, коэффициентов термического расширения, электрических и магнитных характеристик рис.8.

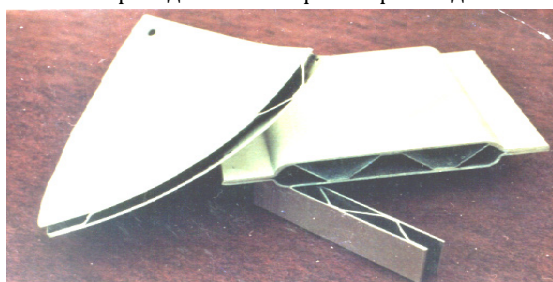
Отметим существенные особенности процесса сварки взрывом, позволяющие успешно применять этот способ в тех случаях, когда традиционные способы не дают желаемого результата. Прочное соединение образуется как при сварке однородных металлов и сплавов, образующих растворы и соединения, так и металлов, которые не соединяются плавлением и диффузионной сваркой. При этом высокие скорости охлаждения в зоне соединения позволяют использовать сварку взрывом, в том числе, для соединения материалов, образующих хрупкие интерметаллидные прослойки, например, сталь-алюминий медь-титан, медь-алюминий и др. Взрывом могут успешно свариваться металлы с прочными поверхностными пленками, например, нержавеющие и высоколегированные стали, соединение которых методами горячей прокатки невозможно. При этом высококачественные поковки и листы могут свариваться без изменения химического состава шва, так как диффузионные процессы при сварке взрывом, как уже отмечалось, не играют существенной роли. Легко могут быть соединены по плоскости материалы с сильно различающимися температурами плавления, например, свинец и вольфрам, алюминий и тантал и т.п.



Переходники электролизеров медь-титан и алюминий-сталь повышенной термостойкости



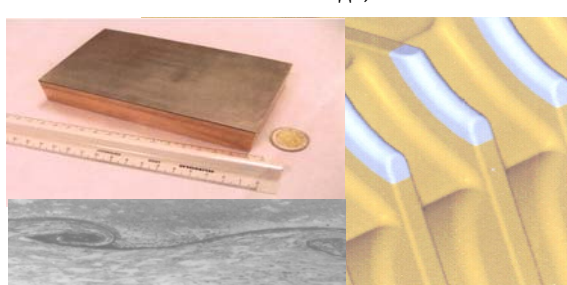
Теплообменники титан-медь, алюминий-титан



Панели из легких сплавов алюминия



Рабочие органы почвообрабатывающих машин



Заготовки из циркониевой бронзы и молибдена



Многослойные композиционные материалы



Заготовки коаксиально плунжерных насосов



Композиционные изделия для микроэлектроники (Cr, Ti-W, Ni-Cr-Si, силициды Ti, W, Mo, Ta)

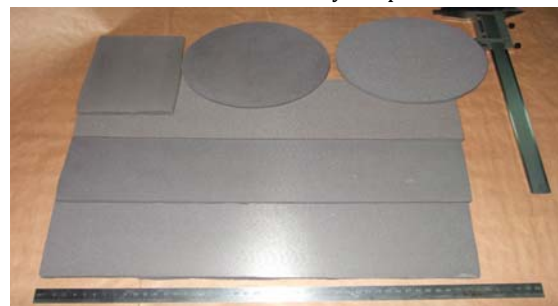


Рис . 8. Материалы и изделия, полученные методом сварки и консолидации взрывом

Сварка взрывом может быть выполнена на значительных площадях, определяемых только габаритами листов (до 30 м²) и ограничивается лишь допустимым весом взрывчатого вещества [9]. При этом толщина плакирующего материала может изменяться в очень широких пределах вплоть до 30 мм.

Как показал опыт, целесообразно использовать сварку взрывом для производства биметаллов в сочетании с прокаткой, что связано с резким улучшением качества продукции. Пакетная сварка металлов прокаткой в сочетании со сваркой взрывом уменьшает необходимую для схватывания степень пластической деформации, расширяет технологические возможности и номенклатуру материалов, снимает ограничения по максимальной толщине биметаллических листов. Высокие служебные характеристики биметаллических плит на основе конструкционных материалов с плакировкой из титана, тантала, (работающих в среде хлора при высокой температуре), нержавеющей стали и т.п. для сосудов химической и вакуумной технологии 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, тяжелонагруженных подшипников скольжения, аксиально-поршневых насосов, bipolarных 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.

Сварка взрывом применяется в сочетании с традиционными методами химико-термической обработки и порошковой металлургии. Существенное повышение качества подшипников скольжения и коаксиально-плунжерных насосов отмечено при использовании сварки взрывом для нанесения изготовленных методами порошковой металлургии антифрикционных спецсоставов бронзы, латуни или меди на сталь вместо наплавки. При создании композиций, образующих интерметаллиды, работающих при повышенных температурах эксплуатации в электролизной промышленности и гидрометаллургии, например сталь-алюминий, медь-титан и т.п., применяются промежуточные слои, позволяющие существенно увеличить ресурс работы материалов.

Большой эффект достигается при применении сварки взрывом в мелкосерийном, но очень эффективном производстве мишеней для ионно-плазменного распыления. Это связано с относительной простотой технологии, отсутствием в технологическом процессе дорогостоящего оборудования и возможностью сварки практически любых металлов и сплавов. Организация производства по обработке материалов взрывом требует лишь хранилища взрывчатых веществ и средств взрывания, специально оборудованного транспорта для перевозки взрывчатых материалов и подготовленного персонала для проведения работ. Вместе с тем процесс сварки взрывом имеет, как и другие процессы, ряд технических ограничений. Существенным недостатком является невозможность сохранить исходную геометрическую форму и размер заготовки при локальной плакировке.

В последние годы в концерне предложена и реализована на специальных установках обработка взрывом, включающая предварительный высокотемпературный нагрев и вакуумирование обрабатываемого материала, ударную сварку и последующую скоростную закалку из жидкого состояния. Расширение диапазона состояний вещества позволило получить компакты и материалы с качественно иными характеристиками из композиционных порошков, в том числе тугоплавких химических соединений с сильными ковалентными связями (нитридных, карбидных, боридных и т.п.), отличающихся высокой твердостью и хрупкостью. Развитие этих работ позволило сформировать новые направления исследований на длительную перспективу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abrahamson G. R. Residual periodical deformations of surface under action of moving jet, *Proc. of ASME, Ser. E, Appl. mechanics*, Vol. 28, 4, 45-55. (1961)
2. Cowan G.R., Holtzman A.H. Flow configurations in colliding plates: explosive banding, *J. Appl. Phys.*, Vol. 34, 4, 928-939. (1963)
3. Deribas A.A., Kudinov V.M., Matveenko F.I. Effect of initial parameters on process of wave formation during explosion welding of metals. *Physics of Combustion and Explosion*, Vol. 3, 4, 561-568. (1967)
4. Godunov, S.K. *et al.* Wave formation during explosion welding, *Journ. Appl. mechanics and techn. physin*, 3, 63-73. (1971)
5. Cowan G.R., Bergmann O.R., Holtzman A.H. Mechanism of bond zone wave formation in explosion-clad metals, *Metallurg. Trans.*, Vol. 2, 11, 3145-3155. (1971)
6. А.А. Дерibas. Физика упрочнения и сварки взрывом, Новосибирск, "Наука", 1972, 188 с.
7. С. Карпентер, Сварка металлов взрывом, Минск, "Беларусь" 1976 г.
8. В.И. Беляев и др., Высокоскоростная деформация металлов, Минск, "Наука и техника", 1976, 226 с с ил.
9. В.Д.Кудинов, А.Я.Коротеев, Сварка взрывом в металлургии, ГЛ., Металлургия, 1978
10. Ковалевский В.Н., Беляев В.И., Смирнов Г.В. Anwendungsmöglichkeiten des Explosionsschweißens für die Herstellung von Verbundmaterialien *Z. Metallkunde* 2, 1979
11. Захаренко И.Д. Сварка металлов взрывом.// Минск. Наука и техника. 1990 г., 205 с.
12. Petushkov V. G. *et al.* Explosive welding criteria. Cambridge 1995.
13. Моделирование и применение высокоскоростных процессов сварки и материалов взрывом / Смирнов Г.В., Шуганов А.Д.//Автоматическая сварка № 11 Киев. 2009.С. 33-42
14. К.П. Станюкович, Неустановившиеся движения сплошной среды, "Наука", 1971.
15. Смирнов Г.В. Эффекты динамической кумуляции, Мн.: "Ремико", 1999. 160 с
16. M.M. Carroll and A.C. Holt, *J. Appl. Phys.*, 43 (1972) 1626.
17. M.M. Carroll, K.T. Kim, and V.F. Nesterenko, *J. Appl. Phys.*, 59, (1986) 1962.
18. V.F. Nesterenko, High-Rate Deformation of Heterogeneous Materials, Nauka, Novosibirsk, 1992.
19. Touvenin J Effect of a Shock Wave on a Porous Solid IV Int Simp. on Detonation Get I 2-15, I 965, White Oak, Md.
- 20.-Deribas A.A el al. On the Oblique Collisions of the Metallic Plates at Extreme Conditions. Int Conf XIII AIRAPT Bangalor, India.
21. R.B. Schwarz, P. Kasiraj, T. Vreeland, Jr., and T.J. Ahrens. in Shock Waves in Condensed Matereals 1983: Proc. Amer. Phys. Soc. Topical Conf., Elsevier, 1984. 435.
22. P. Kasiraj, T. Vreeland, R. Schwarz, and T. Ahrens, in Shock Waves in Condensed Matte-1983: Proc. Amer. Phys. Soc. Topical Conf., Elsevier, 1984, 439.
23. D. Raybold, Int. J. Powder Met, and Powder Tech. 16 (1980) 1.
24. T.J. Ahrens, D. Kostka, T. Vreeland, R.B. Schwarz, and P. Kasiraj, in "Shock Waves in Condensed Matter," Proc. Airier. Phys. Soc. Topical Conf., Elsevier, 1984, 443.
25. Shtertser, Combustion, Explosion and Shock Waves, 24 (1988) 1 13.
26. Prummer R. Explosive compaction of powders - state of art IX Int. Conf HERE, 18-22 Aug. 1986 Novosibirsk, p 169-176.
27. Prummer R. Explosivverdichtung pulveriger Substanzen Werkstoff- Forschung and Technik. Herausgegeben von BTlschner. Bd. 7 Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New- York-London- Paris- Tokyo, 1987, p. 100
28. Sawaoka A.B. Possibilities of Dynamic Technology in Ceramik Industrial Processing Int. Conf. Explomet-85, Portland. Oregon, 1985.
29. Нестеренко В.Ф. Импульсное нагружение гетерогенных материалов. Новосибирск. Наука, 1980
30. D.J. Benson, Modelling Simul . Mater. Sci. Eng., 2 (1994) 535
31. D.I. Benson and W. I. Nellis, Appl. Phys. Lett., 65, (1994).418.