

ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ЭНЕРГИЕЙ ВЗРЫВА

А. А. Дерibas
(Новосибирск)

Исследования по обработке материалов энергией взрыва начаты в первые годы после образования Сибирского отделения АН СССР. Академик М. А. Лаврентьев фактически продолжил работы по исследованию эффектов, возникающих при взаимодействии зарядов конденсированных ВВ с металлическими оболочками, проводившиеся им на Украине в 1944—1946 гг. Целая группа молодых исследователей в 1958—1959 гг. была вовлечена в изучение этого рода проблем, и в 1960 г. поставлены первые эксперименты по упрочнению взрывом высокомарганцовистой стали [1]. Эксперименты с самого начала имели ярко выраженный прикладной характер, поскольку инициативу в их постановке проявили руководители Новосибирского стрелочного завода, получившие информацию об организации в промышленных масштабах процесса взрывного упрочнения сердечников железнодорожных стрелочных крестовин в Канаде. С этого момента началось систематическое изучение процесса упрочнения взрывом в СО АН СССР.

В начале 1961 г. в результате одного из экспериментов по упрочнению случайно была обнаружена сварка взрывом. Полученные результаты по образованию прочного соединения стальных пластин заставили вернуться к работам М. А. Лаврентьева, проводившимся в 1944—1946 гг., когда в результате изучения процесса образования пробивающей струи металла, порождаемой схлопыванием металлической оболочки специального «кумулятивного» заряда бризантного ВВ, были осуществлены попутно две схемы сварки взрывом [1]. В 1963—1964 гг. в Сибирском отделении АН СССР начались исследования процесса прессования взрывом порошкообразных материалов [2].

Интенсивные лабораторные эксперименты привели к необходимости создания специального оборудования — взрывных камер, обеспечивающих безопасность подрывов зарядов ВВ в обычных помещениях, оснащенных устройствами для регистрации параметров взрыва. Были созданы методы расчета взрывных камер на прочность [3], на основе которых в дальнейшем созданы промышленные взрывные камеры, позволяющие организовать использование взрывных технологий обработки материалов в обычных производственных условиях. Работы, начатые в Сибирском отделении АН СССР, получили дальнейшее развитие в Волгограде, Киеве, Минске и других городах страны.

Продолжающиеся в течение 27 лет в Институте гидродинамики, а начиная с 1977 г. и в СКБ гидроимпульсной техники СО АН СССР фундаментальные исследования и прикладные разработки развиваются по следующим основным направлениям.

Упрочнение взрывом. Изучаются фундаментальные проблемы механизма упрочнения ударной волной (УВ) на уровне статистики дефектов кристаллической решетки, порождаемых взаимодействием фронта УВ и последующей разгрузки с решеткой как в случае монокристаллов, так и поликристаллических металлов и сплавов.

В области прикладных разработок созданы и внедрены технологии упрочнения высокомарганцовистой стали, из которой изготавливаются сердечники железнодорожных стрелочных крестовин, зубья ковшей экскаваторов и др. В последнее время проведены исследования по упрочнению сталей и различных сплавов на основе других металлов. Результаты этих исследований изложены в работе [4]. Доказано, что процесс упрочнения взрывом имеет широкие перспективы использования в различных областях техники.

Сварка взрывом. За время, прошедшее после первых экспериментов, детально изучены фундаментальные и прикладные аспекты процесса сварки взрывом. На основе достигнутых результатов созданы теоретиче-

ские модели, позволяющие в рамках макроскопической механики сплошной среды рассчитывать основные параметры соударений, определяющих свойства полученных соединений. Освоен широкий диапазон многослойных материалов, среди которых наибольший интерес представляют сочетания, получение которых без использования взрыва вызывает серьезные затруднения: сталь + титан, сталь + алюминий, сталь + цирконий и т. д.

Прессование порошков. Работы в этом направлении в Сибирском отделении начались в 1964 г. Изучены самые разнообразные порошки, которые помещались в «контейнеры сохранения», подвергаемые взрывному нагружению зарядами бризантных ВВ. На первых порах исследователи ограничивались описанием наблюдаемых изменений физических свойств обрабатываемых порошков. В дальнейшем были проанализированы возникающие в процессе соударения ударно-волновые конфигурации и предложены расчетные схемы явления ударно-волнового обжатия порошков [5].

Рассмотрим более подробно некоторые основные результаты исследований процессов обработки материалов взрывом в Сибирском отделении АН СССР.

Упрочнение взрывом

Высокомарганцовистая сталь. Идея взрывного упрочнения высокомарганцовистой стали была запатентована в США в 1951 г. [6]. В большинстве разработок до настоящего времени при упрочнении используются контактные заряды пластических ВВ со скоростью детонации в пределах 7—8 км/с при плотности 1,5 г/см³. При этом давление на фронте детонационной волны (ДВ) $p \sim 200$ кбар и в зависимости от способа инициирования детонации в упрочняемой детали генерируется УВ с давлением на фронте 200 ÷ 400 кбар. Распространение этой волны по металлу вызывает увеличение твердости, повышение пределов прочности и текучести, уменьшение ударной вязкости и пластичности. В табл. 1 приведены изменения механических характеристик материала при различных схемах упрочнения. На рис. 1 дана схема упрочнения. Отметим, что при упрочнении реальных деталей сложной формы необходимо подбирать геометрическое расположение заряда таким образом, чтобы обеспечить нагружение ДВ упрочняемой поверхности так, чтобы она находилась в условиях, близких к всестороннему сжатию.

Использование мощных пластических ВВ, обеспечивающих значительный эффект упрочнения, не всегда удобно по экономическим соображениям. В последнее время высказана плодотворная идея об использовании промежуточного слоя пористого вещества между ВВ и упрочняемой поверхностью. Если при распространении детонации по заряду в пористом веществе реализуется маховская конфигурация, открывается возможность использования для упрочнения низкоимпульсных дешевых ВВ [7] (рис. 2).

Взрыво-термическая обработка. В начале 70-х годов в технологию упрочнения металлов взрывом предложено ввести важное дополнение. Обзор первых исследований, выполненных в этом направлении, приведен

Т а б л и ц а 1

Изменение механических характеристик материала при различных режимах упрочнения

Состояние	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	H_v	КСУ, МДж/м ² при T , °С	
						+20	-100
Исходное $p = 20$ ГПа ВТО *	875	435	36	33	200	2,7	0,6
	1025	730	31	28	390	1,9	0,4
	975	475	46	31	240	2,7	1,8

* Взрывотермическая обработка (20 ГПа + закалка с 1050 °С в воду).

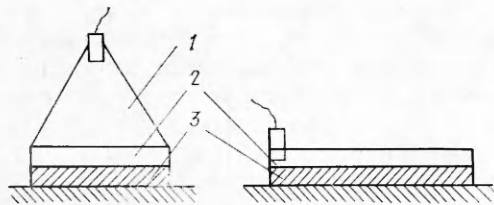


Рис. 1. Схема упрочнения.

1 — генератор плоской волны; 2 — заряд ВВ; 3 — упрочняемый металл.

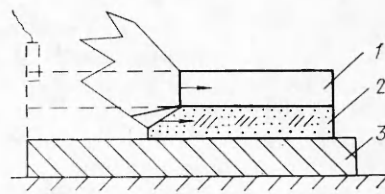


Рис. 2. Упрочнение с промежуточным слоем.

1 — заряд ВВ; 2 — промежуточный слой; 3 — упрочняемый металл.

в работе [4]. Как указывалось выше, воздействие УВ увеличивает прочность и уменьшает пластичность. Причина изменений механических характеристик — в насыщении объема обрабатываемого материала дефектами кристаллической структуры. Чтобы избежать снижения пластичности после воздействия УВ, предложено подвергнуть материал специальной термообработке для получения мелкозернистой структуры, поскольку дефекты должны стать зародышами новых зерен и обеспечить повышение пластичности и ударной вязкости при низких температурах. Для высокомарганцовистой стали термообработкой является рекристаллизационный отжиг при 1045°C . Механические свойства после взрыво-термической обработки (ВТО) показаны в табл. 1. На рис. 3 приведены графики зависимости ударной вязкости от температуры для исходной высокомарганцовистой стали после воздействия ударной волны и взрывотермической обработки. Исследования микроструктуры показывают, что размеры зерен уменьшаются примерно в 10 раз. Очевидно, что взрыво-термическая обработка позволяет оптимизировать механические свойства высокомарганцовистой стали и получить значительный выигрыш эксплуатационных свойств обработанных деталей.

Упрочнение конкретных деталей. 1. Наиболее разработана технология упрочнения сердечников железнодорожных стрелочных крестовин. На рис. 4 приведена схема упрочнения одного из типов сердечников. Здесь одновременно инициируются три заряда, расположенные на поверхностях, подвергающихся максимальному износу при эксплуатационных нагрузках («перескакивание» колеса с одной поверхности на другую). В начале эксплуатации основную роль играет процесс пластического смятия, вызывающий быстрое уменьшение высоты поверхности катания. В дальнейшем происходит упрочнение поверхности катания и основную роль в износе начинают играть абразивные процессы (рис. 5). Упрочнение позволяет исключить начальную зону смятия и значительно увеличить срок службы сердечника. Выигрыш весьма существенно зависит от качества металла и конкретных отливок. В условиях Новосибирского стрелочного завода достигнуто повышение стойкости сердечников в эксплуатации в 1,5—2 раза.

2. Разработана технология упрочнения взрывом зубьев экскаваторов различных типов. Этот метод увеличения срока службы быстроизнашиваемых деталей массового производства нашел достаточно широкое применение на горных предприятиях страны. Упрочнение взрывом позволяет выбраковывать зубья,

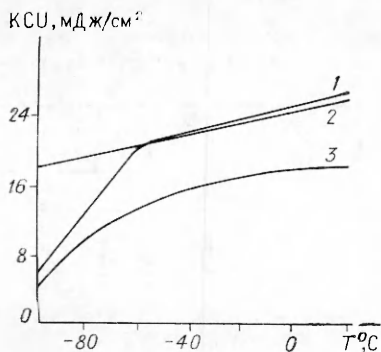


Рис. 3. Упрочнение высокомарганцовистой стали.

1 — $\sigma_B = 85 \div 90 \text{ кгс/мм}^2$; $\sigma_{0,2} = 46 - 47$; $\delta = 32 - 40\%$; 2 — $p = 200 \text{ кбар} + \text{ВТО}$; $\sigma_B = 95 \div 100 \text{ кгс/мм}^2$, $\sigma_{0,2} = 45 \div 50$, $\delta = 45 \div 48\%$; 3 — $p = 200 \text{ кбар}$, $\sigma_B = 95 \div 110 \text{ кгс/мм}^2$, $\sigma_{0,2} = 64 \div 82$, $\delta = 27 - 36\%$.

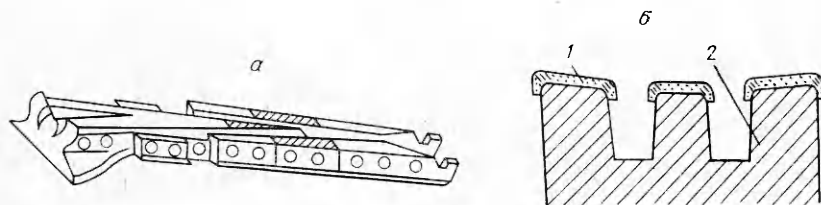


Рис. 4. Схема упрочнения стрелочной крестовины.

а) крестовина (места упрочнения заштрихованы); б) схема расположения заряда: 1 — заряд ВВ; 2 — крестовина.

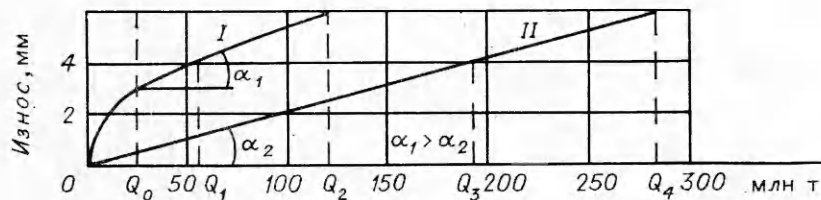


Рис. 5. Характер износа сердечника, без упрочнения (I) и после упрочнения (II) (Q — количество груза, пропущенного по крестовине).

отлитые с дефектами, и увеличить срок службы зубьев, прошедших упрочнение, в 1,5—2 раза.

3. Для деталей сложной геометрической конфигурации разработана технология упрочнения футеровок дробильных мельниц различных типов. При сложной геометрии рабочей поверхности использование «охватывающей» схемы (см. рис. 4, б) должно сопровождаться тщательным подбором величины нависания, чтобы избежать нежелательного взаимодействия противостоящих друг другу элементов заряда, которое может вызвать разрушение упрочняемой детали. Данные об упрочнении различных деталей горного оборудования приведены в [8].

Упрочнение других материалов. К настоящему времени наиболее подробно изучены малоуглеродистые и аустенитные нержавеющие стали, а также дисперсионно упрочненные суперсплавы на никелевой основе [4]. Для малоуглеродистых сталей ферритного класса изучалась возможность использования ВТО для понижения порога хладноломкости при низких температурах. Полученные данные приведены в табл. 2. На образце нержавеющей стали 1X18H9T исследован эффект повышения прочности, вызванный действием контактного заряда ВВ, и влияния повышения температуры на полученный эффект упрочнения (табл. 3). Для никелевых суперсплавов зафиксировано значительное уменьшение скорости ползучести и увеличение времени жизни при высоких температурах (рис. 6).

Таблица 2

Малоуглеродистая сталь (МСтЗсп)

Состояние стали	$\sigma_{0,2}$, МПа при T , °C		σ_B , МПа при T , °C		δ , % при T , °C		KIC, МДж/м ²		$T_{кр}$, °C	
	+20	-50	+20	-50	+20	-50	1	2	1	2
	Исходное	325	405	540	670	21	19	1,2	0,9	-25
5 ГПа + Т/О	390	570	610	810	19,5	13,5	1,5	0,9	-30	0
10 ГПа + Т/О	365	585	565	840	24	22	1,0	0,7	-30	0
Мелкозернистое состояние + +10 ГПа	473	680	600	865	15	13	1,9	0,6	-40	-30

Примечания: 1. Образцы I типа (радиус в вершине надреза $v=1$ мм, ГОСТ 9454—78). 2. Образцы II типа ($v=0,25$ мм).

Таблица 3

Механические свойства стали 1X18H10T при комнатной и повышенных температурах испытания

p , ГПа	T , °C	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
0	20	600÷700	350÷450	40÷30	39
	600	350÷400	200÷250	20	10
	700	300÷330	190÷230	16	18÷32
	800	210÷240	150÷190	16	20
9	20	720	610	35	31
	600	400	350	13	39
	700	260	230	20	33
	800	162	146	42	40
12 *	20	880	790	20	25
13 **	20	880	790	20	30
20	20	1200	1120	10	10
	600	480	380	12	12
	700	410	350	12	12
	800	320	290	5	15
40	20	1540	1440	6	—
	600	490	430	12	12
	800	190	140	50	70
5 ***	20	860	830	4	
	800	280	240	24	

* Косые УВ.
 ** Плоские УВ.
 *** Послегечение 8 %.

Сварка взрывом.

Физико-механические основы процесса

Наиболее распространенная схема сварки взрывом приведена на рис. 7. Здесь наряду с исходными данными — массой заряда ВВ, величиной зазора, определяющего путь разгона метаемого элемента и т. д., показаны основные кинематические параметры, определяющие режим соударения: скорость точки контакта v_k и динамический угол соударения γ . В настоящее время эти параметры с достаточной точностью измеряются экспериментально и связаны расчетными формулами с начальными параметрами схемы сварки.

Многочисленными исследованиями показано, что знание величин v_k и γ в первом приближении достаточно для определения области сварки определенной пары металлов. В плоскости $\gamma - v_k$ область сварки схематически может быть показана следующим образом (рис. 8 [1]). По современным представлениям существует нижняя граница сварки, вблизи которой осуществляется наиболее качественная сварка с минимальным количеством расплавов. Структура сварного соединения может быть волнообразной или безволновой, но в обоих случаях прочность соединения, как правило, превышает прочность слабейшего из материалов соединя-

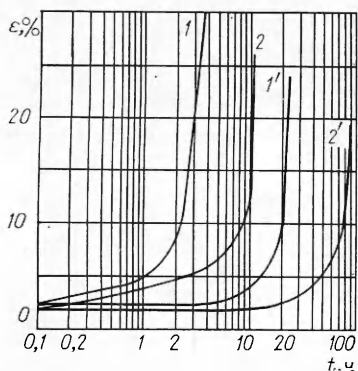


Рис. 6. Кривые ползучести никелевых суперсплавов. 1, 2 — без упрочнения; 1', 2' — после упрочнения. Условия испытаний: 1, 1' — $T = 800^\circ\text{C}$; $\sigma = 210$ МПа; 2, 2' — $T = 750^\circ\text{C}$; $\sigma = 210$ МПа.

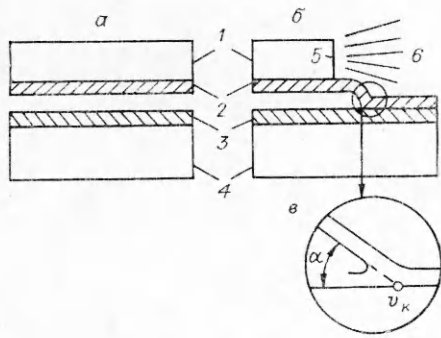


Рис. 7. Схема сварки взрывом.
1 — заряд ВВ; 2 — метаемая пластина; 3 — неподвижная пластина; 4 — основание; 5 — фронт детонации; 6 — продукты детонации.

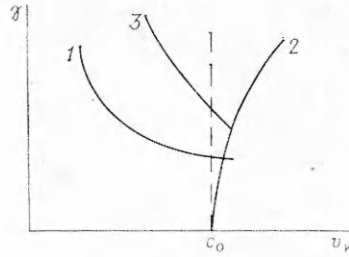


Рис. 8. Схема области сварки в плоскости $\gamma - v_k$.
1 — нижняя граница сварки; 2 — граница сверхзвуковой области; 3 — верхняя граница сварки.

емой пары. Поскольку сварка вблизи нижней границы определяется в первую очередь минимальным количеством ВВ и является наиболее экономичной при высоком качестве соединения, естественно, что на теоретическое и экспериментальное определение нижней границы исследователи направляют наибольшие усилия.

В ее определение для ряда практически важных комбинаций металлов наибольший вклад сделан в [9, 10]. В. А. Симоновым [20] обнаружен подъем кривой, определяющей границу сварки при больших скоростях точки контакта, и предложена гипотеза, определяющая его появление. По его мнению, при больших скоростях точки контакта появляется избыток энергии, вызывающий появление расплавов и уменьшающий прочность соединения. В работе [21] предложена гипотеза, обуславливающая положение нижней границы сварки появлением потока массы вещества впереди точки контакта, влияющего на процесс самоочищения соединяемых поверхностей. В последнее время И. Д. Захаренко и В. М. Фомицу [21] удалось рассчитать теоретически положение нижней границы и показать удовлетворительное совпадение теоретических расчетов с экспериментальными данными для ряда сочетаний металлов. Задача дальнейших исследований — выявление основных физических параметров, определяющих в действительности процесс соединения в окрестности точки контакта таких как давление, температура и другие, каким-то образом связанных с параметрами γ и v_k . Эти исследования позволят найти объяснение некоторым еще непонятным фактам, зафиксированным разными авторами в процессе исследований сварки взрывом.

Металловедческие исследования. За двадцатипятилетний срок исследований сварки взрывом получено несколько сотен сочетаний различных металлов и сплавов. Металловедческий анализ зоны соединения, проведенный разными авторами, показывает, что следует подразделять все множество полученных соединений на два больших раздела. Классификация определяется свойствами промежуточного слоя, который располагается вдоль границы раздела, образуется в течение времени сварки, определяемого несколькими микросекундами, и имеет толщину от нескольких сотен микрон до долей микрона. Изучение этого слоя из-за его малой толщины весьма затруднительно и в настоящее время базируется в основном на исследованиях с помощью микронзондов типа «Камяк» [1].

В случае, когда соединяемые материалы не образуют химических соединений, в промежуточном слое наблюдаются любые концентрации одного элемента в другом, независимо от их взаимной растворимости в обычных условиях. Соединения образуются как при весьма ограниченной взаимной растворимости соединяемых материалов (сталь + медь), так и при практическом отсутствии таковой (медь + молибден).

Когда соединяемые металлы образуют химические соединения, концентрация элементов в промежуточном слое примерно соответствует все-

му спектру возможных соединений (железо + алюминий, железо + титан и т. д.). Соединение металлов обычными способами затруднено, поскольку промежуточные химические соединения — интерметаллиды — хрупкие и ухудшают механические свойства соединений. При сварке взрывом тонкие и неравномерные вдоль шва прослойки интерметаллидов не оказывают столь же отрицательного влияния на прочность, как при обычных методах сварки, например, для сочетаний сталь + титан и сталь + алюминий может быть достигнута прочность, превышающая прочность слабейшего из материалов пары.

Структура промежуточного слоя при сварке взрывом до настоящего времени детально не выяснена. Имеющееся предположение о том, что в этом слое металл находится в аморфном состоянии [11], из-за несовершенства использованной аппаратуры не может считаться полностью доказанным.

В настоящее время в литературе усиленно дискутируется вопрос, является ли сварка взрывом сваркой в твердом или жидком состоянии. По нашему мнению, следует считать бесспорно установленным, что процесс сварки взрывом происходит в течение нескольких микросекунд, в течение которых металл в окрестности точки контакта находится в **пластическом** состоянии, когда он способен течь, как жидкость, поскольку действующие напряжения значительно превосходят его прочность. По-видимому, в течение этого времени кристаллическая решетка может сохраниться, хотя и в весьма искаженном виде, подобно тому, как сохраняется кристаллическая решетка в кумулятивной струе [12]. Таким образом, сварка взрывом занимает промежуточное положение между различными типами сварки в твердом и жидком состояниях.

Следует заметить, что избыток энергии соударения может вызвать расплавление (частичное или полное) поверхностных слоев металлов и полученное строение соединения будет неотлично от сварки в жидком состоянии. Однако такое плавление, по-видимому, фактор вторичный и не определяет существо дела. Особенно трудны для исследования случаи, когда при оптическом увеличении не обнаруживается никакого промежуточного слоя. По нашему мнению, наиболее естественно предполагать, что он тем не менее присутствует на границе раздела и необходимо его изучать с применением все более тонких методов анализа, постепенно проникая на расстояния, соизмеримые с параметром решетки. Эти исследования должны дать окончательный ответ на вопрос о природе сварки взрывом.

Приложения сварки взрывом. С середины 60-х годов в СССР освоено производство плоских многослойных листов с помощью сварки взрывом. Наибольший интерес представляет производство трехслойных листов из малоуглеродистой стали 08КП, с двух сторон плакированных нержавеющей сталью 1X18N9T [13]. При производстве этого триметалла сляб из малоуглеродистой стали толщиной 120 мм, размерами 4×1,2 м в результате двух последовательных подрывов плакируется с двух сторон листами нержавеющей стали толщиной 15 мм. Полученный трехслойный пакет прокатывается по традиционной схеме в рулон толщиной 2—4 мм, толщина слоев нержавеющей стали колеблется в пределах 0,15—0,18 мм. Полученный материал используется в сельскохозяйственном машиностроении при производстве машин для внесения в почву жидких аммиачных удобрений. Антикоррозионная стойкость плакировки в этих условиях полностью обеспечивает необходимые эксплуатационные свойства агрегатов.

На ряде предприятий страны освоено производство двухслойных заготовок подшипников скольжения, где используется стальная основа, на которую с помощью взрыва наносится антифрикционный слой. Производятся заготовки, где на стальную основу наносится слой латуни толщиной от 0,5 до 1,5 мм. Применение сварки взрывом вместо традиционной анодной наплавки позволяет значительно увеличить производительность труда и в несколько раз сократить расход дорогостоящих и дефицитных

медных сплавов. Использование стальной основы дает возможность увеличить прочность подшипника, а равномерная толщина наносимого слоя латуни позволяет до минимума свести механическую обработку. Освоены технологии получения как плоских, так и цилиндрических заготовок, процесс происходит в условиях предприятия на специализированном участке сварки взрывом во взрывной камере. На производстве получают заготовки для подшипников различного диаметра — от 40 до 300 мм.

Сварка взрывом применяется также для получения подшипниковых заготовок из биметалла сталь + алюминиево-оловянный сплав А020 для мощных дизелей. Известно производство подобного материала способом центробежной заливки с последующей прокаткой, но сварка взрывом позволяет получить для больших и тяжелонагружаемых подшипников достаточно толстую стальную основу, которая не может быть достигнута способом прокатки из-за ограничений, накладываемых прочностью прокатных валков. Здесь используется и комбинированная технология, когда биметалл, полученный способом прокатки, взрывом приваривается к стальной основе необходимой толщины.

Сварка взрывом широко используется в настоящее время для изготовления деталей металлургического оборудования [14]. Взрывом производятся заготовки из биметалла сталь + медь для различных деталей электрометаллургических агрегатов. В настоящее время большинство деталей изготавливается из монолитной меди с каналами для охлаждения. Биметалл сталь + медь обеспечивает прочность за счет стальной основы, а теплопроводность — слоем меди соответствующей толщины. Среди внедренных в производство двухслойных деталей — кессоны сводов мощных рудотермических печей. Для изготовления этих крупногабаритных деталей необходимо получить каналы для охлаждения, которые значительно увеличивают межремонтную кампанию агрегатов и дают значительный экономический эффект. Для эффективного получения каналов используется схема сварки с вырубкой, когда на основание укладываются специальные металлические ножи по форме необходимого профиля канала. В результате сварки взрывом снимаемый слой прорубается, что позволяет избежать дорогостоящей и трудоемкой операции фрезерования крупногабаритных заготовок. При изготовлении кессонов обычно прорубленные каналы закрываются каким-либо из традиционных способов сварки. Возможны и другие варианты изготовления каналов, например раздутием мест искусственных непроваров, заполнение предварительно проделанных каналов каким-либо удаляемым наполнителем и т. д. Все эти способы опробованы в производственных условиях и могут быть эффективно использованы с учетом индивидуальных особенностей деталей.

Изготавливались также двухслойные кристаллизаторы различных конструкций (рис. 9). В случае применения монолитной меди вследствие термических нагрузок от расплавленного металла они довольно быстро изменяют форму. Это затрудняет увеличение слитка после кристаллизации и требует механической обработки внутренней поверхности кристаллизатора. После нескольких обработок последний теряет работоспособность. С помощью биметаллических стенок можно эффективно использовать высокотемпературную прочность стального каркаса, а также избежать трудоемкого глубокого сверления, делая каналы для охлаждения каким-либо из описанных выше способов.

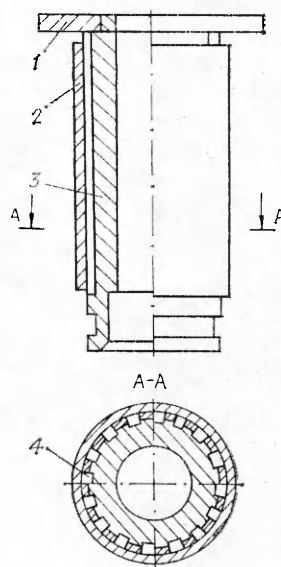


Рис. 9. Биметаллический цилиндрический кристаллизатор. 1 — кольцо стальное; 2 — обечайка; 3 — труба медная; 4 — ребра жесткости.

Сварка взрывом позволяет получать прочные соединения, когда традиционные методы сварки затруднены или вовсе неприемлемы, например комбинации сталь + алюминий и его сплавы, сталь + титан и др. В этих случаях получают прочные биметаллические заготовки как плоские, так и цилиндрические, которые могут эффективно использоваться в технике. Такие антикоррозионные материалы, как титан, используются для плакировки внутренних поверхностей различных сосудов, содержащих химически активные среды, для чего в разных странах организовано крупномасштабное производство биметалла сталь + титан. Кроме использования в виде листов, из таких заготовок можно вырезать отдельные биметаллические элементы, которые используются как переходники для соединения различных элементов конструкций. Наибольший масштаб приобрело изготовление переходников сталь + алюминий, используемых для соединения алюминиевых штанг со стальным шипом при производстве токоподводов к электролизерам для производства алюминия. Эффективно применяются в различных конструкциях также переходники сталь + титан, способные обеспечивать высокую прочность соединения как в условиях статических, так и динамических нагрузок.

Прессование порошков

Наиболее интенсивно исследовалась схема прессования в цилиндрическом контейнере, приведенная на рис. 10. Ударно-волновые конфигурации, возникающие при различных соотношениях массы заряда и контейнера, детально исследованы в работе [5], возможные ударно-волновые конфигурации показаны на рис. 11. Отметим, что такие же случаи наблюдаются и при прессовании порошков в плоской геометрии, но здесь труднее нейтрализовать действие волн разгрузки, стремящихся разорвать контейнер. Очевидно, что для наиболее равномерного прессования обрабатываемого порошка необходимо добиваться осуществления ударно-волновой конфигурации, содержащей коническую волну. Теоретический расчет ударно-волновых режимов требует использования мощных ЭВМ и наиболее полно реализован в исследованиях [14].

Механизм соединения частиц при взрывном прессовании порошков исследован в работе [5]. Основной процесс, управляющий образованием монолитных компактов, — большая пластическая деформация, определяющая выделение тепла по границам частичек. Весьма существенным параметром является характерный размер частичек по отношению к ширине фронта. При слишком малом их размере выделение тепла за фронтом УВ становится близким к равномерному и специфические эффекты, определяющие взрывное прессование порошков, исчезают.

Приложения прессования порошков. Интерес к взрывному прессованию порошков вызван несколькими причинами. Во-первых, хотелось преодолеть ограничения, при которых сварка взрывом не может быть использована для соединения хрупких неметаллических материалов и попытаться соединить, например, металл с керамикой. В настоящее время получены и успешно используются в производстве композиции металл + керамика + металл. Представляло также интерес улучшение свойств некоторых материалов, что предполагалось достичь в результате взрывного прессования. Проведена серия исследований по прессованию твердого сплава ВК (карбид вольфрама + кобальт) [16]. Исследования показали, что при этом происходит

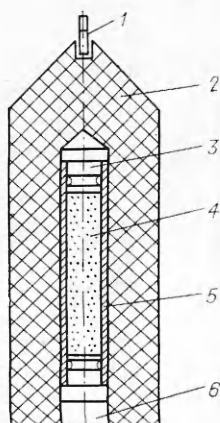


Рис. 10. Цилиндрическая схема взрывного компактирования.
1 — детонатор; 2 — заряд; 3, 6 — нижняя и верхняя пробки ампулы соответственно; 4 — компактируемый порошок; 5 — оболочка ампулы.

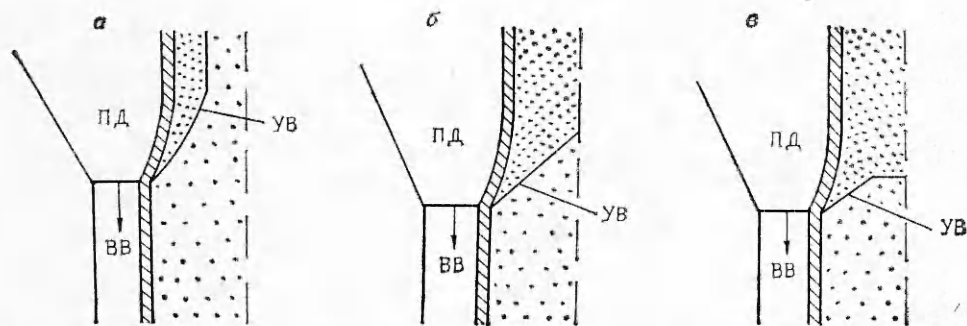


Рис. 11. Ударно-волновые конфигурации при взрывном прессовании пористых материалов в цилиндрической геометрии.

упрочнение кобальтовой связки, а также зафиксирована пластическая деформация зерен карбида вольфрама. Наблюдаемые эффекты дают возможность предположить, что произойдет улучшение эксплуатационных характеристик инструмента, изготовленного из твердого сплава, обработанного взрывом. В [17] осуществили синтез некоторых сверхпроводящих материалов и исследовали их свойства. В работе [18] из смеси порошков в цилиндрическом контейнере синтезирован титанат бария, причем одновременно с синтезом зафиксирована поляризация полученных кристаллов. В работе [19] исследовано повышение каталитической активности некоторых окислов после взрывной обработки.

В последнее время среди исследователей возник устойчивый интерес к проблеме взрывной обработки аморфных материалов, так называемых «металлических стекол». Эти сплавы различного химического состава получают на лабораторных и промышленных установках в условиях сверхбыстрого охлаждения из расплава, когда в процессе затвердевания не успевают образоваться кристаллическая решетка. Материалы обладают уникальными антикоррозионными, прочностными и магнитными свойствами, но специфика их образования позволяет изготавливать лишь тонкие фольги или порошки, что ограничивает возможности реализации в технике заложенных в этих материалах преимуществ. Получение же объемных образцов обычными способами сварки или спекания в принципе невозможно, поскольку возникающие перегревы неизбежно вызывает формирование кристаллической структуры. Проведенные исследования по ударно-волновой обработке «металлических стекол» как у нас [15], так и в других странах, показали, что взрывная обработка позволяет зафиксировать аморфное состояние в образующихся монолитных образцах. Этот путь представляется чрезвычайно перспективным для будущих разнообразных технических приложений.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерibas. Физика упрочнения и сварки взрывом. Изд. 2. Новосибирск: Наука, 1981.
2. А. А. Дерibas, Н. Л. Добрецов, В. М. Кудинов. Докл. АН СССР, 1966, 168, 3, 665.
3. А. Ф. Демчук. ПМТФ, 1967, 5, 289.
4. А. А. Дерibas и др.— В кн.: II Советское совещание по обработке металлов взрывом. Новосибирск, 1982.
5. А. А. Дерibas, А. М. Ставер. ФГВ, 1974, 10, 4, 568.
6. McLeon. Patent USA N 2 703 297. March 1955.
7. Н. А. Костюков.— В кн.: II Советское совещание по обработке материалов взрывом. Новосибирск, 1982.
8. Ю. Г. Матвеев, Г. П. Кобельков, Д. И. Тараско. Строит. и дорож. машины, 1974, 6, 6.
9. I. D. Zacharenko.— In: 8-th Int. Conf. on High Energy Rate Fabrication. San Antonio, USA, June 1984.
10. А. А. Дерibas, В. В. Пай, В. А. Симонов.— В кн.: Обработка металлов взрывом. Т. 1. Марианские Лазни, 1976.

11. M. Hammerschmidt, H. Kreye. The Role of Adiabatic Shearing in Explosive Welding.— В кн.: Тр. II Совещ. по обраб. материалов взрывом. Новосибирск, 1982, с. 117.
 12. R. E. Green. First X-Ray Diffraction Photograph of a Shaped Cavity Jet.— In: Fin. Rep. on Task Order 72—574 for Battelle Columbus Lab. Durham Oper., Jan. 1974, Res. Sci. Instrum., 1975, No 46, p. 4173.
 13. Ю. А. Конон, В. Н. Федоров, Л. Б. Первухин и др. Коррозионно-стойкий биметалл для сельхозмашиностроения. М.: Машиностроение, 1984.
 14. M. Wilkins, A. Kusubov, C. Cline. Dynamic Compaction of Aluminium Nitride Powder.— In: Int. Conf. "Explomet-85", Portland, 1985.
 15. В. Ф. Нестеренко. ФГВ, 1985, 21, 6, 85.
 16. Э. Ш. Чагелешвили. ФГВ, 1971, 7, 2, 275.
 17. И. М. Барский, В. Я. Диковский, А. И. Матыцин. ФГВ, 1972, 8, 4, 578.
 18. А. А. Дерibas, А. М. Ставер. ФГВ, 1970, 6, 1, 122.
 19. G. Borekov, I. Sazonova, V. Maly. The Influence of Shock Compression on the Catalytic Properties of Oxide Semi-Conductor Catalysts.— In: Behaviour of Dense Media under High Dynamic Pressures Symp., HDR, Paris, Sept, 1967. Paris, Dunod, 1968.
 20. В. А. Симонов.— В кн.: Высокоэнергетическое воздействие на материалы. Новосибирск, 1986.
 21. А. И. Гулидов, И. Д. Захаренко, В. В. Киселев и др. Там же.
-