



СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СВАРКИ ВЗРЫВОМ И ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ УДАРОМ (Обзор)

Л. Д. ДОБРУШИН, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализирован мировой уровень промышленных технологий сварки взрывом (источник энергии — взрывчатое вещество) и высокоскоростным ударом (источники энергии — пневматические и пороховые ствольные устройства, высокоскоростные водяные струи). Особое внимание уделено попыткам создания ручного инструмента для локальной (точечной) сварки высокоскоростным ударом. Кратко рассмотрены возможные перспективы совершенствования и развития технологий сварки взрывом и высокоскоростным ударом.

Ключевые слова: сварка взрывом, сварка высокоскоростным ударом, конструкционные материалы, ручной инструмент

Уже более 40 лет сварку взрывом (СВ) успешно применяют в различных отраслях промышленности. В специальной литературе неоднократно публиковались материалы обзорного характера, освещающие опыт применения СВ [1–4].

Основными областями применения СВ в бывшем СССР и странах СНГ являются производство биметаллов и изготовление из них трубных досок для мощных теплообменных аппаратов массой до десятков тонн, двух- и трехслойных материалов для оборудования, работающего в агрессивных средах, плакирование лопастей турбин для ГЭС ка-

витационно-стойкими покрытиями, плакирование покрытиями из бронзы поверхностей скольжения тяжело нагруженных подшипников. Согласно данным работы [3], существует более 260 соединений разнородных металлов, полученных с помощью СВ и нашедших практическое применение. В качестве основного слоя преимущественно используют углеродистые и низколегированные стали, плакирующего — высоколегированные стали и сплавы меди, никеля, титана, алюминия, а также цирконий, тантал. Длительный опыт эксплуатации продемонстрировал долговечность и надежность соединений, полученных с помощью СВ.

На рис. 1 обобщены и классифицированы основные области применения СВ.

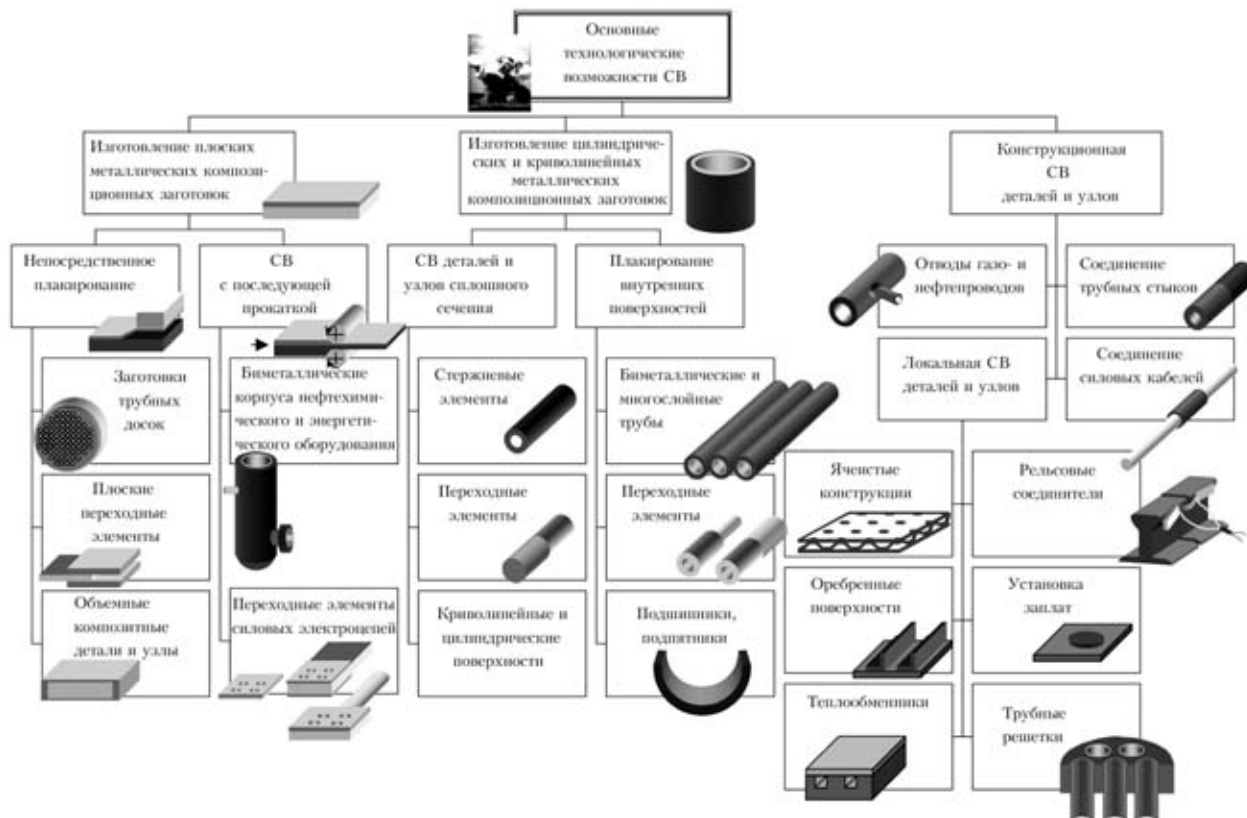


Рис. 1. Основные технологические возможности СВ в соответствии с классификацией, представленной в работе [4]

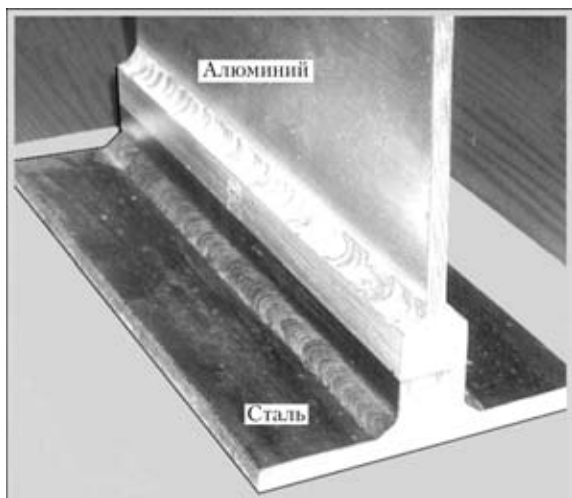


Рис. 2. Соединение алюминия со сталью, выполненное дуговой сваркой через биметаллический переходник, полученный СВ



Рис. 3. Труба диаметром 1500 мм, плакированная изнутри слоем тантала СВ

Поскольку приведенная выше информация является общеизвестной, остановимся далее на примерах применения СВ, с которыми автор настоящего обзора ознакомился в последние годы в порядке личной инициативы и в процессе установления и развития сотрудничества с рядом зарубежных фирм.

Фирма SMT («Shockwave Metalworking Technologies», Нидерланды), организованная в 1962 г., успешно освоила производство биметаллов различных сочетаний и размеров. Основные области их применения: судостроение (переходники сталь + алюминий (рис. 2)), химическая и нефтяная промышленность (плакирование труб и изделий из них с антикоррозионными покрытиями, изготовление трубных досок для теплообменников, соединение труб), автомобилестроение (тормозные диски и подшипники), электротехника (токосъемные биметаллические рельсы, переходники для силовых цепей), различные изделия с антикоррозионными и износостойкими покрытиями. Фирма располагает двумя вакуумируемыми взрывными камерами мощностью 40 и 150 кг в тротиловом эквиваленте и имеет большой опыт СВ в глубоком вакууме. Специалисты фирмы утверждают, что выполнение СВ в вакууме позволяет уменьшить краевые непровары и увеличить суммарную площадь плакируемого изделия не менее чем на 20 %, а также снизить побочный звуковой эффект взрыва, что является принципиально важным для соблюдения Европейских норм по шуму при проведении взрывных работ.

Фирма «Dynamit Nobel» (торговая марка «Dynamit Nobel», Германия) одной из первых освоила промышленное производство СВ коррозионноустойчивых биметаллов для химической промышленности (трубные доски для теплообменников), цветной металлургии (переходники для силовых электрических цепей), вакуумного технологического оборудования (трубные переходники нержавеющая сталь+алюминий), судостроения. Фирма располагает открытым полигоном и подземным участком для проведения взрывных работ, а также оборудованием для правки плакированных взры-

вом изделий и их испытаний. Важным техническим показателем потенциала фирмы в области СВ может служить производство труб, плакированных изнутри танталовым покрытием (рис. 3). Диаметр труб составляет 1500 мм, длина — 7500 мм, толщина стенки — 15 мм, толщина покрытия — 1,0 мм. Вся продукция фирмы сертифицирована согласно международным стандартам.

Фирма «Nobelclad» (Франция) с 1968 г. использует СВ для производства биметаллов и входит в тройку мировых лидеров в этой области. Продукция фирмы весьма разнообразна. СВ используется при производстве химического и нефтехимического, ядерного и теплового (рис. 4) оборудования, в гидроэнергетике, производстве насосов и бумаги, пищевой промышленности, сельскохозяйственном машиностроении, изготовлении силовых биметаллических переходников и других изделий. Одним из приоритетных видов продукции фирмы являются сталеалюминиевые изделия для судостроения.

Основные параметры плакированных взрывом изделий могут быть следующими: толщина основного металла — 2... 500 мм, толщина плакирующего слоя — 1... 30 мм, максимальные габариты — 11,6×4,5 м, площадь однократного плакирования — 34 м², максимальная масса — 40 т.

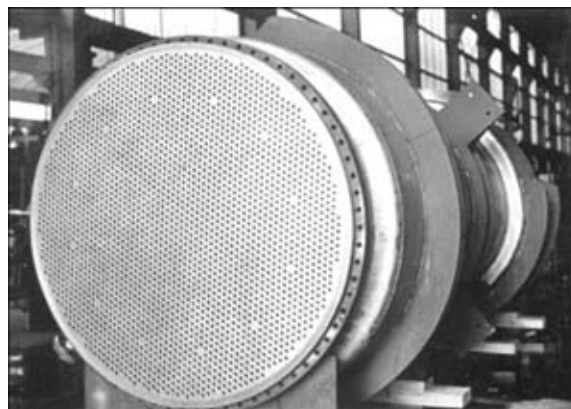


Рис. 4. Теплообменник, изготовленный с использованием биметаллической (сталь+титан) трубной доски

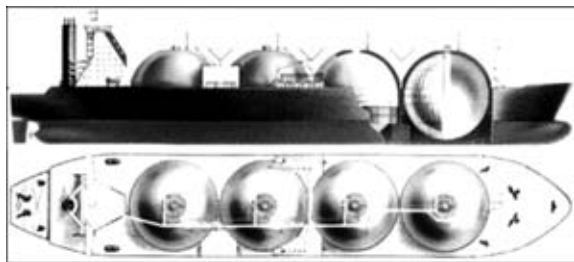


Рис. 5. Схема судна для перевозки жидкого азота с использованием 4-слойных переходников, полученных с помощью СВ

Существует уникальное оборудование для обеспечения взрывных работ и правки плакированных заготовок, а также оперативного разрушающего и неразрушающего контроля их качества. Вся продукция фирмы сертифицирована согласно международным стандартам.

Фирма «Nitro Metall AB» (Швеция), выделившаяся из «Nitro Nobel Group», производит широкий ассортимент продукции, в том числе для ядерной энергетики, судостроения и нефтедобычи в Северном море. Максимальная толщина биметаллических плит достигает 300 мм, а площадь — 30 м². Фирма производит плакирование взрывом биметаллических и многослойных заготовок и изделий, которые находят применение в строительстве морских ледокольных судов и судов для транспортирования жидкого азота (рис. 5). В последних используются 4-слойные (алюминий+титан+никель+нержавеющая сталь) переходники, с помощью которых обеспечивается крепление сферических хранилищ жидкого азота к корпусу судна. Фирма имеет исследовательскую лабораторию по контролю качества продукции на соответствие ISO 9002.

В Европе еще ряд фирм занимается СВ, но в рамках настоящего обзора осветить их деятель-

ность не представляется возможным (и в этом нет необходимости, поскольку по техническим возможностям, качеству и экономическим показателям они заняты конкурентным производством аналогичной продукции).

В последние годы технологии СВ широко внедрены в промышленность некоторых стран Юго-Восточной Азии, в частности Республики Корея. Следует отметить такие наиболее известные в этой стране фирмы, как HAN-WHA («Korea Explosives»), «Korea Heavy Industry Inc.», «DAEWHA». В этих фирмах используют преимущественно технологии, заимствованные в западных странах, но уровень их исполнения почти не уступает западному. В Японии под торговой маркой «BACLAD» производят биметаллические материалы с покрытиями из нержавеющей стали, титана, никелевых сплавов, меди, бронзы, хастеллоя в листах площадью до 30 м². Очевидно, что СВ постепенно становится технологической операцией, доступной для использования большинству промышленно развитых стран мира.

При плакировании листов больших размеров, когда соединение металлов по всей поверхности не является необходимым, используют локальную СВ (точечную или линейную). Применение этих способов резко сокращает расход взрывчатого вещества (ВВ) и снижает стоимость продукции. Самый простой способ локальной СВ предусматривает расположение заряда ВВ в виде полосы на метаемой пластине, после чего свариваемые пластины погружаются в сосуд с водой на глубину 5...50 см. Вода, находящаяся над зарядом, ограничивает свободный разлет продуктов детонации и увеличивает зону направленного действия взрыва. Однако эффективность этого способа незначительна, и он нетехнологичен.

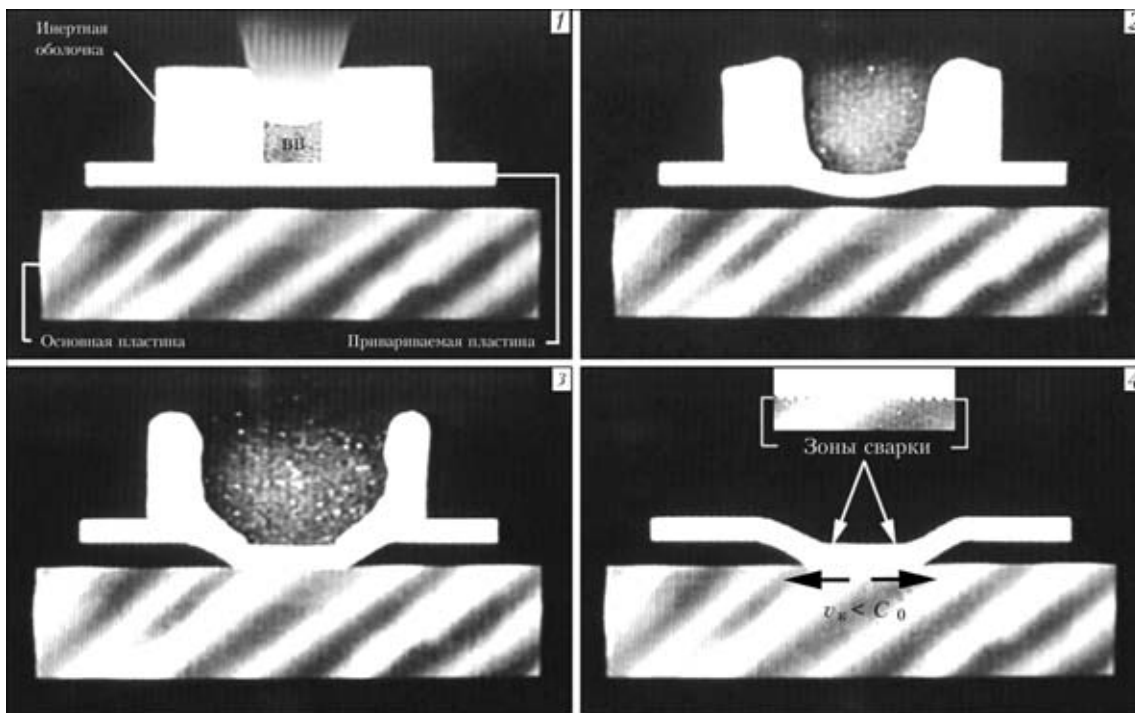


Рис. 6. Кинематика процесса точечной (линейной) сварки цилиндрическим зарядом ВВ, помещенным в оболочку из инертного материала: 1-4 — кадры последовательности процесса

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан более эффективный и технологичный способ локальной СВ. Сущность его заключается в том, что цилиндрический заряд ВВ со скоростью детонации 6000...8000 м/с и плотностью 1,60...1,65 г/см³ помещают в оболочку из инертного материала (резины или пластилина). Заряд располагают на поверхности привариваемой пластины перпендикулярно к ней (для точечной сварки) или вдоль нее (для линейной сварки). Кинематика процесса локальной СВ представлена на рис. 6 в виде фрагментов из фильма «Сварка и резка взрывом» (ИЭС им. Е. О. Патона, 1979 г.) и в комментариях не нуждается.

Локальная (точечная) сварка может осуществляться и в режиме высокоскоростного удара (СВУ), не требующего применения ВВ, о чем свидетельствует опыт мировых войн XX столетия. Этот процесс представляет несомненный интерес для практики настоящего времени прежде всего с точки зрения возможности относительно легкой реализации этого режима в лабораторных и цеховых условиях. Кроме того, режимы СВУ, в отличие от СВ, не сопровождаются действием остаточного давления продуктов детонации и избыточным импульсным действием на изделие.

В качестве энергетических средств разгона свариваемых пластин или деталей до необходимой скорости 250...500 м/с в существующих способах СВУ могут быть использованы электромагнитные ускорители, пороховые и пневматические ствольные системы, высокоскоростные водяные струи и другие ускорители или ударники. Все они должны обеспечивать в зоне соударения пластическую деформацию свариваемых поверхностей на заданную глубину и их прочное соединение.

Наиболее распространенной еще с 1950-х гг. технологией, которая может быть отнесена к СВУ, является технология магнитно-импульсной сварки, принципиальные основы которой и соответствующее оборудование разработаны в ИЭС им. Е. О. Патона [5]. Аналогичные разработки, выполненные компанией «Pulsar, Ltd.» (Израиль), в настоящее время получили широкое развитие. Разгон свариваемых деталей и их соударение по этой технологии осуществляются под углом (как и при СВ) импульсом сильного магнитного поля (рис.

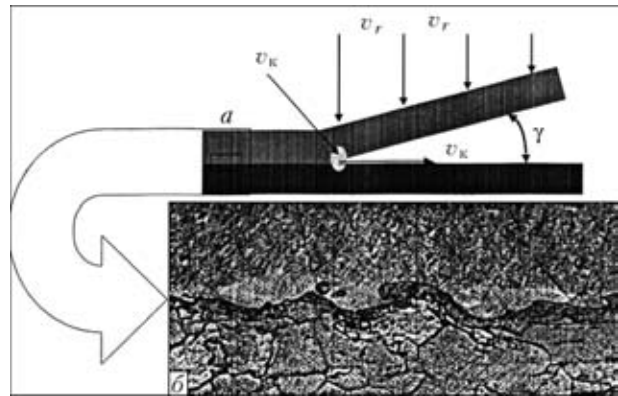


Рис. 7. Принципиальная схема процесса магнитно-импульсной сварки (а) и микроструктура сварного соединения (б); v_k — скорость точки контакта; v_r — скорость соударения

7). Технология оказалась весьма удобной и эффективной при серийном производстве коаксиальных изделий с обеспечением нахлесточного соединения разнородных материалов, в частности алюминий+медь. Однако промышленное применение данной технологии сопряжено с необходимостью создания или приобретения дорогостоящего оборудования.

Достаточно востребованными, особенно в последние годы, являются способы СВУ с использованием ствольных систем. Как следует из литературных источников и рекламных материалов, к настоящему времени разработано несколько вариантов таких систем. Впервые о точечной СВУ, как о физическом эффекте, сообщалось исследователями высокоскоростного удара в 1965 г. [6]. Было обнаружено, что при гиперзвуковом ударе микрочастиц или ударников по материалу, находящемуся в контакте с другим материалом, в месте удара происходит формирование точечной сварки между материалами.

Примерно десятью годами позже фирма «Explo-weld, Ltd.» (Швеция-Англия-Шотландия) представила в своем рекламном листке способ СВУ и устройство для его осуществления в виде ручного портативного пистолета для точечной сварки (рис. 8). В результате высокоскоростного удара пластины с основанием происходит образование соединения по кольцевой поверхности. Масса устройства составляет 6,5 кг, калибр — 18 мм. Толщина при-



Рис. 8. Ручной пистолет и принадлежности для точечной СВУ (а); макросечение (б) и микроструктура (в) сварного точечного соединения сталь+латунь, X50

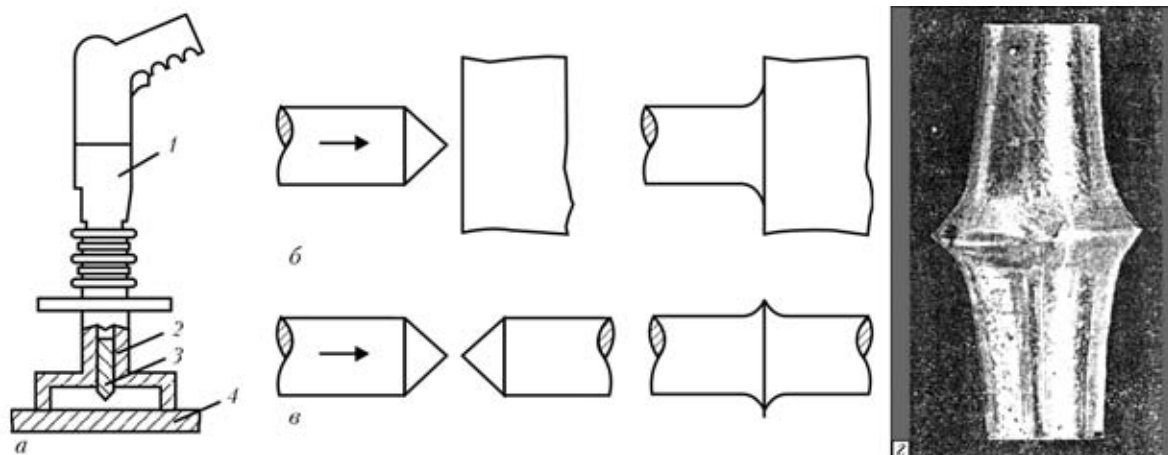


Рис. 9. Схема переносного устройства (пистолета) для СВУ шпилек (а), схемы процесса сварки шпилек с основанием (б) и между собой (в): 1 — пистолет-ускоритель шпилек; 2 — защитный чехол; 3 — шпилька; 4 — основание для приварки шпилек; z — фотография сваренных встык медных шпилек диаметром 9,5 мм [7]

вариваемой пластины не превышает 3 мм, диаметр свариваемого пятна обычно равен примерно 15 мм. В зависимости от толщины привариваемой пластины применяют три различных по мощности патрона. Комбинации свариваемых материалов такие же, как и при СВ, но привариваемая пластина должна по возможности иметь высокие пластические свойства.

В 1990-х гг. появились публикации о новом тогда процессе СВУ металлических шпилек [7, 8]. Устройство для СВУ сконструировано на основе ручного пистолета калибром 9,5 мм (рис. 9). Получены качественные соединения различных пар металлов как в безволновом, так и волновом режимах сварки. В частности, создано и эксплуатируется переносное приспособление для СВУ медных прутков встык и локального приваривания шпилек. Для увеличения пластических деформаций в зоне сварки разработчиками успешно использован технологический прием сведения торцов соединяемых шпилек на конус.

Перспективными представляются способы точечной СВУ с использованием ствольных систем и воды как передающей среды. Такие системы предполагают прямое метание «водяного снаряда» на плакирующую пластину и растекание по ее поверхности на площади, намного превышающей площадь поперечного сечения ствола, что снимает ограничения на форму и размер плакируемой поверхности.

Развитие техники гидроабразивной резки металлов способствовало созданию оборудования, генерирующего водяные струи сверхвысокой скорости (500... 1000 м/с, напор в несколько сотен мегапаскалей). Область использования данного оборудования для СВУ ограничена малым сечением струй (обычно диаметр составляет десятки доли миллиметра, для самых мощных установок — 1... 2 мм). Тем не менее, появился ряд работ немецких и арабских исследователей, в которых изучена эффективность применения высокоскоростных водяных струй для СВУ тонких фольг и пластин [8–12].

В 1976 г. впервые появилось сообщение группы исследователей Ганноверского технического уни-

верситета (Германия) о проявлении СВУ при резке алюминиевых листов водяными струями при давлении 70... 350 МПа [8]. Сварку осуществляли при однократном ударе отрезка водяной струи по поверхности алюминия, накрытой без сварочного зазора алюминиевой фольгой толщиной 0,2 мм. Диаметр зоны соединения примерно в 3 раза превышал толщину листа (2 мм).

Годом позже опубликованы данные специального исследования эффекта, при котором получены высококачественные сварные соединения алюминия, меди, армко-железа, никеля, свинца, цинка, нержавеющей стали [9]. Площадь приваривания фольг толщиной 0,2... 0,4 мм достигала 20 мм², а работа пластической деформации — 2... 5 МДж/м². Реализовывались как волновые, так и безволновые режимы точечной сварки.

В 1996 г. группа исследователей из арабских стран предприняла аналогичные исследования, используя вместо стационарной установки для гидроабразивной резки модификацию ручного пистолета (рис. 10, а) [11]. Скорость водяного ударника, необходимая для образования сварного соединения, достигала 550 и 750 м/с при диаметрах сопел соответственно 5 и 3 мм.

На рис. 10, б изображена кинематическая схема процесса удара и растекания водяной струи о привариваемую к основанию пластину (фольгу), а также происходящей при этом пластической деформации пластины. Были оптимизированы фокусные расстояния (расстояния между соплом и свариваемой поверхностью). Определены оптимальные режимы сварки фольг толщиной от 0,1 до 0,25 мм из алюминия, низкоуглеродистой и нержавеющей стали с основанием из нержавеющей стали. Начальный зазор между фольгой и основанием изменяли от 0 до 2,5 мм. Определены сверхграничные по отношению к локальной сварке режимы истечения водяной струи, при которых уже происходит перфорация (пробивание) фольг. В статье [11] даны соответствующие практические рекомендации по применению технологии СВУ.

Рассмотренные ствольные системы относятся к малокалиберным и в основном могут применяться только для точечной СВУ ограниченных по тол-

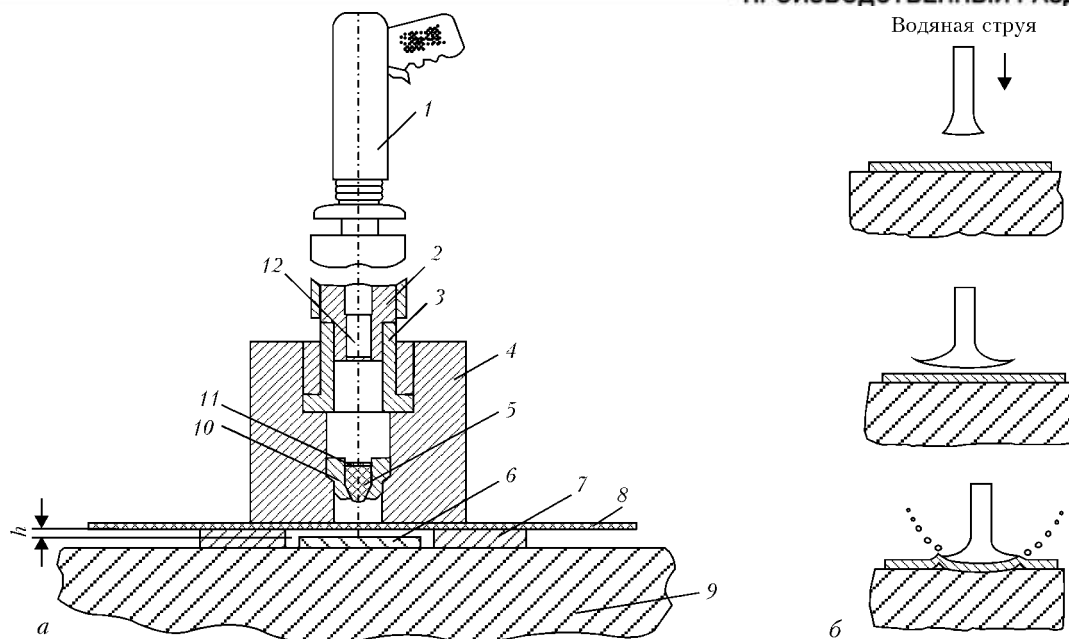


Рис. 10. Схема модифицированной конструкции водяного пистолета (а) и кинематическая схема процесса точечной сварки ударом водяной струи с помощью этого пистолета (б) [11]: 1 — пистолет; 2 — ствол; 3 — переходник; 4 — монтажная деталь; 5 — вода; 6 — основание; 7 — калибратор зазора; 8 — ускоряемая пластина; 9 — опора; 10 — сопло; 11 — пластмассовый диск; 12 — ударник; h — сварочный зазор

щине привариваемых пластин (фольг) и площади получаемых соединений. Для увеличения этих показателей необходимо использовать средне- или крупнокалиберные баллистические ствольные системы.

Как свидетельствуют данные работ [13, 14], первыми баллистические установки в исследованиях СВУ применили канадские ученые. Они использовали специально сконструированную пороховую пушку калибра 76 мм, способную разгонять легкий (дерево, пенопласт, капрон) поддон с закрепленной на нем метаемой пластиной (медь толщиной 3,175 мм) со скоростью до 800 м/с.

Таким образом, перечисленные варианты СВУ реализуются в плане классических представлений о СВ и режимах соударения, укладываемых в обычное «окно свариваемости». И все же ВВ имеют большое преимущество по сравнению с энергетическими источниками СВУ, являясь источником мощности и большого запаса энергии и отличаясь намного большей универсальностью при решении практических задач СВ.

В любом случае сферой применения перечисленных технологий типа СВУ без ВВ останутся относительно мелкомасштабные изделия из преимущественно мягких пластичных металлов. Для высокопрочных металлов и крупномасштабных изделий использование СВ останется необходимостью. В связи с этим кратко коснемся вопроса о перспективах организации промышленных взрывных участков и специализированных полигонов.

Растущие требования к экологической чистоте технологий еще в конце прошлого века привели к вытеснению открытых взрывных работ из городов и ближних пригородных зон на удаленные полигоны. Ужесточение этих требований неизбежно влечет за собой дальнейшую организационную эволюцию. Вынос полигонных работ на расстояния

50... 100 км и более связан с транспортными расходами и неудобствами для персонала. Поэтому для СВ среднemasштабных изделий более подходящим решением представляется создание в пригородных зонах участков взрывных камер усовершенствованной конструкции с автоматизированным циклом загрузки-разгрузки и очистки атмосферы. В этом отношении ИЭС им. Е. О. Патона располагает уникальной взрывной камерой трубчатого типа мощностью около 200 кг ВВ в тротиловом эквиваленте. Аналогичная промышленная взрывная камера успешно эксплуатируется в ГKB «Южное» (г. Днепропетровск, Украина).

В настоящее время в мире при выполнении крупномасштабных заказов по металлообработке взрывом все чаще используют подходящие крупные природные и техногенные объекты: заброшенные шахты, тоннели и портовые сооружения, пещеры, ненаселенные острова. Однако развитие этого направления сдерживается из-за отсутствия достаточного количества заказов для постоянной загрузки крупномасштабных полигонов, вследствие чего даже для такой страны, как Украина, их содержание пока экономически невыгодно.

Теория и практика СВ прошли уже длительный путь развития, однако ряд принципиальных проблем остается нерешенным до сих пор. Это связано с тем, что СВ представляет собой сложный физический процесс, в котором реализуются сверхвысокие физико-механические параметры и на субмикросекундные времена возникают огромные градиенты этих параметров в малых объемах (0,01... 0,30 мм). Сложность анализа процессов СВ такова, что ее исследование может занять еще не одно десятилетие. При этом общепризнано, что наиболее актуальным направлением дальнейших исследований СВ в ближайшие несколько лет будет исследование структуры «окна свариваемости»,



особенно области, прилегающей к его нижней границе, а также поиски технологических способов влияния на положение нижней границы.

К настоящему времени определились следующие основные направления поисков:

химическая подготовка соединяемых поверхностей;

«затягивание» времени существования положительного давления в зоне формирования соединения;

выполнение процессов металлообработки взрывом при повышенной начальной температуре и др.

Представляется, что в обозримом будущем технологические процессы СВ смогут осуществляться с выполнением целого комплекса мер, обеспечивающих надежное формирование соединения при низких скоростях и давлениях удара, а следовательно, при резко пониженных импульсах нагружения, степени упругопластического деформирования обрабатываемых конструкций и их элементов.

Весьма перспективным является развитие методов компьютерного моделирования СВ. До сих пор использование численных методов в СВ ограничивалось попытками моделирования волнообразования как физического явления и разработкой вспомогательных программ для расчета оптимальных режимов СВ, особенно в случае многослойной СВ.

Существует возможность компьютерного моделирования технологических задач СВ с расчетом полей напряжений и деформаций во всем объеме изделий, что намного дешевле и проще реального эксперимента. Неизбежная неточность расчетов и ограниченность постановок модельных задач не являются препятствием, так как после выполнения численного расчета для подбора оптимальных режимов достаточно проведение ограниченного количества проверочных экспериментов.

До сих пор применение технологического моделирования сдерживалось громоздкостью разработки и поддержания специального программного обеспечения (необходимостью иметь небольшой собственный «вычислительный центр» в технологическом подразделении). В настоящее время эти трудности сняты в связи с наличием удаленных систем и баз данных, получаемых через Интернет. Можно ожидать, что в последующие 10...20 лет компьютерное моделирование СВ превратится в рутинный технологический инструмент.

Что касается наиболее перспективных областей применения СВ, то исходя из наметившихся в пос-

ледние годы тенденций в промышленности как в Украине, так и странах СНГ и за рубежом, можно выделить следующие основные направления: внутреннее и наружное плакирование взрывом длиннономерных труб и стержней; создание плоских и трубчатых электрических переходников и соединений различных типов и назначения; улучшение свариваемости и служебных свойств стыковых сварных соединений из высокопрочных алюминиевых сплавов с помощью предварительного или последующего их плакирования взрывом, а также другие частные задачи, возникающие при проектировании и изготовлении сварных металлоконструкций, когда СВ является наиболее востребованной и эффективной.

1. *Crossland B.* Explosive welding of metals and its application. — Belfast, Oxford: Clarendon press, 1982. — 233 p.
2. *Сварка металлов взрывом. Композиционные материалы XXI века / В. И. Лысак, В. С. Седых, С. В. Кузьмин и др. // Наука — производству. — 2000. — № 1. — С. 12–17.*
3. *Копон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д.* Сварка взрывом / Под ред. В. М. Кудинова. — М.: Машиностроение, 1987. — 216 с.
4. *Производство металлических слоистых композиционных материалов / А. Г. Кобелев, В. И. Лысак, В. Н. Чернышев и др. — М.: Интернет Инжиниринг, 2002. — 496 с.*
5. *Дудин А. А.* Магнитно-импульсная сварка металлов. — М.: Металлургия, 1979. — 128 с.
6. *Effects on oblique shocks produced at metal interfaces by hypervelocity particle impact / R. F. Rolsten, A. K. Hopkins, W. A. Dean, H. H. Hunt // Welding J. — 1967. — 46, № 11. — P. 517–522.*
7. *Salem S.A.L., Dawood K. A., Al-A'anie H.M.* Spot welding by using high speed projection // Intern. J. Joining of Materials. — 1989. — 1, № 3. — P. 1–3.
8. *Erdmann-Jesnitzer F., Louis H.* Flüssigkeitsschtrahlen mit hoher Geschwindigkeit zur Oberflächenbehandlung // Machinery Market (Würzburg). — 1976. — 82, № 98. — P. 1902–1904.
9. *Erdmann-Jesnitzer F., Louis H., Wiedemeier J.* Punktschweißen dünner Metallfolien mit dem Flüssigkeitsschlagverfahren // Ibid. — 1977. — № 85. — P. 1907–1909.
10. *Erdmann-Jesnitzer F., Louis H., Wiedemeier J.* Untersuchungen zum Aufschweißen von Metallfolien durch Flüssigkeitsschlag // Metall. — 1978. — 32, № 8. — S. 794–798.
11. *Turgutlu A., Al-Hassani S.T.S., Akyurt M.* Impact welding of foils by water jets // Welding J. — 1996. — № 11. — P. 41–45.
12. *Pat. 3409975 USA, cl. 29-470.1.* Welding by high energy stress front / R. F. Rolsten, D. Onlo, H.H. Hunt, M. La Calif. — Publ. 12.11.68.
13. *Botros K. K., Groves T. K.* Fundamental impact-welding parameters — an experimental investigation using a 76-mm powder cannon // J. Appl. Phys. — 1980. — 51, № 7. — P. 3706–3714.
14. *Botros K. K., Groves T. K.* Characteristics of the wavy interface and the mechanism of its formation in high-velocity impact welding // Ibid. — 1980. — 51, № 7. — P. 3715–3721.

State-of-the-art in commercial technologies for explosion (using explosives as energy sources) and high-velocity impact (using pneumatic and powder channel devices, as well as high-velocity water jets as energy sources-welding) is analysed. Separate consideration is given to attempts to build a hand tool for local (spot) high-velocity impact welding. Possible trends in development and upgrading of explosion and high-velocity impact welding technologies are considered.

Поступила в редакцию 12.05.2004