

## ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ (Обзор)

Дж. Г. БЭНКЕР, вице-президент компании DMC (г. Болдер, Колорадо, США)

Приведен обзор использования технологий сварки взрывом в современном производстве. Рассмотрены их возможности и недостатки по сравнению с другими технологиями сварки металлов, представлены основные области применения этого способа сварки.

*Ключевые слова:* сварка взрывом, плакированный металл, плакирование взрывом, сварка переходников, сосуды высокого давления, теплообменники, автоклавы

Первые публикации по сварке взрывом появились в середине прошлого века. В течение 1950-х годов несколько научных организаций в мире расширили научно-исследовательскую деятельность в сфере обработки металлов взрывом, главным образом применительно к формовке, упрочнению, прошивке и прессовке. В 1959 г. фирма «Дюпон» подала первую патентную заявку на сварку взрывом. Тремя годами позже она приступила к промышленному производству трехслойных плит для изготовления американских монет. В течение 1960-х годов фирма «Дюпон» завершила разработку технологии сварки взрывом, расширила ее промышленное применение и лицензировала свою технологию «Detaclad» для производителей, использующих взрывные технологии в Европе и Азии. Параллельно с этим некоторые научные учреждения разработали свои варианты такой технологии. Наиболее распространенными стали технологии, созданные в Советском Союзе. В течение последующих лет начались широкие исследования взрывной технологии. В настоящее время взрывные технологии применяют в мире свыше 40 компаний [1–7].

За указанный период были разработаны также способы получения сваркой взрывом микроточечных соединений для электроники, стыковых соединений труб для газовой промышленности, соединений труб с трубными досками для энергетики, все виды точечных соединений, в том числе и нахлесточные стыковые швы для биметаллических бритвенных лезвий. Хотя сварка взрывом зарекомендовала себя как высокоуниверсальная технология, большинство изобретений в этой области не нашли применения. Исключением стало изготовление плакированных плит и переходников из разнородных металлов.

На сегодня около 80 % мировой продукции, полученной с применением сварки взрывом, со-

ставляют плакированные плиты, применяемые главным образом для изготовления коррозионно- и износостойкого оборудования (рис. 1). Около 10 % продукции — это биметаллические переходники, широко используемые в промышленности при выполнении разнородных соединений (рис. 2), например, алюминия со сталью. Диапазон изделий этого типа составляет от бронированных мишеней до мишеней ионного распыления и электронных монтажных плат.

Сварка взрывом является высокоуниверсальной технологией, которая может использоваться для соединения промышленных металлов почти в любом сочетании, приемлема также для соединений как одно-, так и разнородных металлов. Последнее стало важным стимулом для промышленного развития этой технологии. В настоящее



Рис. 1. Плакированные взрывом плиты титан (10 мм) + сталь (117 мм) размером 2200×8000 мм

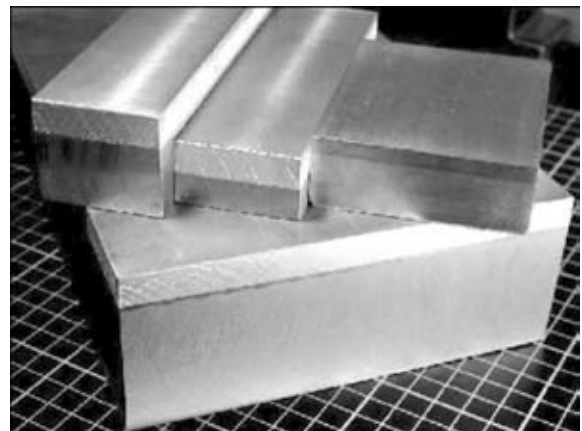


Рис. 2. Сварные переходники из разнородных металлов



время с помощью сварки взрывом получают надежные соединения алюминия и титана со сталью. Качественное соединение этих металлов достигнуто благодаря отсутствию значительного нагрева, поскольку при сварке взрывом нет временно-температурных условий, необходимых для диффузии и формирования хрупких интерметаллидов.

Сварка взрывом идеально подходит для выполнения плоскостных соединений на больших площадях между металлическими плитами или листами. Размеры плакированных плит (длина и ширина) ограничиваются в основном размером поставляемых заготовок, а не техническими возможностями сварки взрывом. Для большинства имеющихся промышленных металлов, из которых изготавливают метаемые пластины толщиной 3 мм и меньше, длина ограничивается 1200 мм. Марки металлов, используемых для более толстых покоящихся оснований, обычно имеют ширину от 2500 до 3500 мм (в зависимости от типа сплава). Для многих типов металлов два или более листа могут быть сварены торцевым стыковым швом до плакирования (с использованием обычных процессов сварки плавлением) с целью укрупнения обычного размера плиты. Следует заметить, что сегодня возможно изготовление листов (плит) шириной до 5000 м и длиной до 13 м, при этом диапазон толщины очень большой. Так, толщина метаемой плиты, называемой плакирующей, может составлять от 0,1 до 50,0 мм, а основной плиты — от 0,1 мм до более чем 100 мм.

В настоящее время основное применение сварки взрывом — изготовление крупных плоских плакированных плит с различным сочетанием материалов (таблица). Плиты, плакированные взрывом, могут легко деформироваться в цилиндрические заготовки и днища при изготовлении

промышленного оборудования (реакторы, колонны, компоненты теплообменников).

Существуют три промышленные технологии изготовления плакированных плит — соединение металлов горячей прокаткой, нанесение наплавленного слоя и плакирование взрывом [8]. Во многих случаях сварка взрывом является наиболее универсальным процессом.

Соединения горячей прокаткой выполняются небольшой группой станов для прокатки толстых плит. В этом процессе плакирующий и основной металлы соединяются вместе во время горячей прокатки. Получение соединения горячей прокаткой, являющейся высокотемпературным процессом, в значительной мере ограничивается соединением таких металлургически однородных металлов, как нержавеющая сталь и никелевые сплавы со сталями. Этот процесс применяется для производства большого количества плакированных плит малой и средней толщины. Их стоимость часто оказывается ниже, чем в случае плакирования взрывом металла толщиной 25 мм. Горячекатаные изделия обычно приемлемы для изготовления большинства сосудов. При этом биметалл имеет более низкий предел прочности на сдвиг и худшее сопротивление коррозии по сравнению с двумя другими технологиями. Последнее главным образом относится к сплавам, подвергающимся термообработке на твердый раствор, т. е. нагреву, за которой следует быстрое охлаждение. К таким материалам относятся высоколегированные аустенитные нержавеющие сплавы, дуплекс-стали и некоторые никелевые сплавы.

Плакирующий слой наплавляется на основной металл с использованием дуговой сварки. Наплавка приемлема при получении необходимых профилей, при работах в полевых условиях и изготовлении толстостенных реакторов, работающих под давлением. При наплавке дуговой сваркой наплавляемый и основной металл расплавляются на границе раздела, при этом разбавление наплавляемого металла основным может вызвать снижение коррозионной стойкости биметалла, что ограничивает область применения этого процесса. Усадка металла шва во время охлаждения может вызвать деформацию, если основной металл тонкий, поэтому при толщине основного металла менее 75 мм наплавку редко используют для изготовления нового оборудования. По сравнению с горячей прокаткой наплавка сваркой ограничивается металлургически однородными металлами — в основном нержавеющими сталями и никелевыми сплавами, соединяемыми со сталью.

Плакирование взрывом — наиболее универсальный способ изготовления плакированных плит. Будучи технологией холодной сварки, она позволяет получать изделия с высокой прочностью соединения в сочетании с устойчивостью к

**Типичные сочетания материалов в биметаллах, полученных сваркой взрывом**

Плакирующий металл	Основной металл (лист, плита, поковка)
Алюминий и алюминиевые сплавы	Плиты: углеродистая сталь
Медь/латунь/бронза/Cu-Ni	
Никель и никелевые сплавы	легированная сталь
Аустенитные нержавеющие стали	нержавеющая сталь
Ферритные/мартенситные нержавеющие стали	Алюминий
Нержавеющие дуплекс-стали	Медь
Титан	
Цирконий	
Серебро	
Тантал	



Рис. 3. Плакированная титаном колонна (диаметр 5000 мм, масса 450 т) для изготовления ОТК



Рис. 4. Реактор для гидрогенизации (диаметр 4500 мм, масса более 1000 т), плакированный нержавеющей сталью

коррозии исходных компонентов, которая не изменяется при изготовлении биметалла. Процесс плакирования взрывом пригоден для соединения почти любых сочетаний обычных технических металлов. Он нашел применение при нанесении на стали алюминия, титана, циркония, никелевых сплавов и нержавеющей сталей. Альтернативные технологии изготовления плакированного металла обычно ограничиваются последними двумя материалами. Плакирование взрывом является основной промышленной технологией при изготовлении биметаллов, когда плакирующий сплав и основной металл не совместимы с металлургической точки зрения, например, титан, цирконий, алюминий или тантал, наносимый на сталь. Плакирование взрывом обычно ограничивается производством плоских плит или концентрических цилиндров. Затем плакированные плиты при необходимости подвергаются формовке и служат для изготовления различных изделий. Если обработка выполнена правильно, расслоение биметалла обычно не происходит.

Плакирование взрывом широко используется при изготовлении сосудов под давлением и теплообменников, работающих в условиях коррозионноустойчивых процессов при высоком давлении и/или высокой температуре. Оно главным образом применяется в химической, нефтехимической, гидрометаллургической, нефтяной и газовой промышленности, а также для рафинирования химических продуктов. Ниже приведены наиболее интересные примеры ее применения. Более детальные описания, включая изготовление оборудования и области применения сварки взрывом, содержатся во многих источниках [9–16].

*Оборудование для производства очищенной терефталевой кислоты (ОТК).* Оно предназначено для производства полиэстера и широкой номенклатуры спутных продуктов. Для устойчивости цвета изделий широкого потребления необходима высокая чистота кристаллической ОТК. Процесс производства ОТК включает жидкофазное окисление ароматических углеводородов, обычно парацелена при температуре около

250 °С. Этот процесс не особо коррозионноопасен, однако чтобы обеспечить необходимую степень чистоты, допустимая скорость коррозии в реакторах основного процесса должна быть крайне низкой. Поскольку титан обеспечивает высокий уровень сопротивления коррозии в рабочей среде, он широко применяется для плакирования стали. На рис. 3 показана плакированная титаном колонна [10].

*Реакторы рафинирования.* В современных технологиях рафинирования для придания сырью, содержащему тяжелые остаточные углеводороды, более высокого уровня качества используют каталитические процессы гидрогенизации. Эти реакторы обычно работают при температуре около 500 °С в условиях очень высокого давления, в связи с чем в качестве конструкционного материала выбирают хромомолибденовые стали. На рис. 4 показан типичный реактор для гидрогенизации. Как и в случае ОТК, рабочая среда является не слишком коррозионноактивной, но при этом возникает проблема водородного охрупчивания. Обычно применяется плакирование нержавеющей сталью, что связано с необходимостью создания водородного барьера. Однако при неправильном выборе технологии плакирования наплавкой возникают расслоения, вызванные водородным охрупчиванием. Для определения устойчивости к расслоению в условиях гидрогенизации распространенным методом испытания является ASTM G-146. Многочисленные эксперименты показали, что изделия, плакированные взрывом по технологии DMC «Detaclad», не расслаиваются при испытаниях G-146 [11, 12].

*Никелевые автоклавы.* Выщелачивание кислот под давлением является одним из предпочтительных процессов при извлечении никеля из латеритных руд. Этот процесс происходит в условиях высоких температур (250 °С) и давления (5 МПа) при концентрации серной кислоты от 5 до 10 %. Титан является единственным промышленным металлом, обеспечивающим адекватное сопротивление коррозии в этой среде. Для необходимой производительности сосуда должны быть доволь-



Рис. 5. Плакированный титаном автоклав (диаметр 5100 мм, масса 100 т) для извлечения никеля и кобальта из латеритных руд в кислой среде под давлением

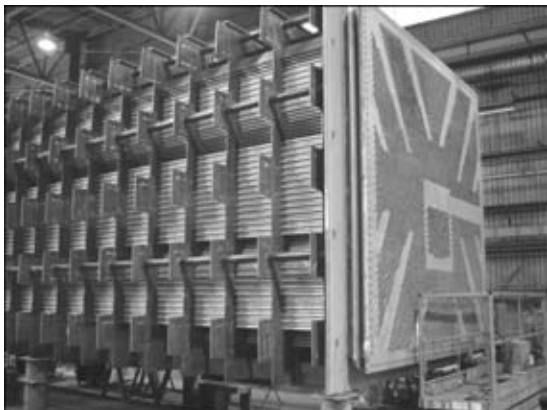


Рис. 6. Конденсатор для электросиловой установки с титановыми трубами и трубными досками, плакированными титаном



Рис. 7. Оболочечно-трубный теплообменник с циркониевыми трубами, кожухом из нержавеющей стали и трубными досками (сталь-цирконий), применяемый при производстве азотной кислоты

но большими — с внутренним диаметром около 5 м и длиной 30 м. Подходящим выбором при изготовлении этих автоклавов является плакирование титаном (рис. 5) [13].

*Трубные доски конденсаторов энергетических установок.* Генерирующие устройства обычных и ядерных электростанций нуждаются в очень больших конденсаторах низкого давления для конечной конденсации в паровой цепи. Конденсаторы, как правило, имеют конструкцию трубчатого теплообменника с трубками из нержавеющей стали или титана для транспортировки охлажда-

ющей воды. В водоохлаждаемой части установки должно быть обеспечено металлургическое соответствие между трубками и трубными досками. Во всем мире широко используются трубные доски, плакированные взрывом титаном или нержавеющей сталью. На рис. 6 показана типичная трубная доска конденсатора.

*Конденсаторы охладителей азотной кислоты.* Оболочечно-трубные теплообменники применяются для нагрева или охлаждения рабочей промышленной среды, например, в химических установках и при рафинировании химических продуктов. Рабочая среда или среда охлаждения (или они обе) могут отличаться высокой коррозионной активностью. Обычно более коррозионная среда течет по трубам, а менее коррозионная находится в сосуде вне труб. Трубы могут быть изготовлены из углеродистой стали (при минимальной коррозионной среде), а также титана, циркония или тантала (при высокой коррозионности). Сплав, выбранный для наружной стороны трубной доски, обычно согласуется со сплавом, выбранным для труб. При большом давлении толщина трубных досок быстро увеличивается, поэтому плакирование взрывом обеспечивает значительную экономию затрат во многих установках. На рис. 7 показан конденсатор охладителей азотной кислоты. По циркониевым трубам транспортируется горячая конденсируемая азотная кислота. По сосуду из нержавеющей стали течет низкокачественная охлаждающая вода. Трубная доска из нержавеющей стали плакирована цирконием (плакирование взрывом).

*Переходники.* Свариваемые переходники, изготовленные из биметаллов, полученных сваркой взрывом, позволяют полностью выполнять сварные переходы между разнородными металлами в обычной производственной обстановке. Сварка взрывом хорошо подходит для соединения разнородных металлов таких, как алюминий и сталь. На рис. 8 представлена схема переходника, облегчающая изготовление изделий в цехах сварки плавлением. Крупные плакированные плиты требуемого сочетания металлов нарезаются на стержни, диски или необходимые профили. Они поставляются в сварочные производственные цеха, где свариваются вместе с другими элементами оборудования с использованием различных способов сварки плавлением. Сварку взрывом широко применяют для изготовления переходников алюминий-сталь (включая нержавеющие стали); другими стандартными сочетаниями металлов являются алюминий-медь, алюминий-титан и титан-сталь.

Переходники обычно используются в качестве соединителей в тех местах, где механические соединения являются слабыми местами. Основные сферы применения следующие:

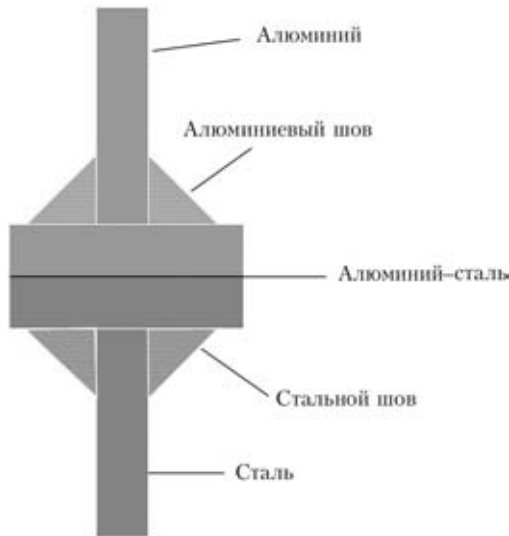


Рис. 8. Схема переходника алюминий-сталь, вырезанного из биметалла, полученного сваркой взрывом

для получения высокопрочных, свободных от трещин соединений между алюминиевыми пере-  
мычками и стальными палубами (в судовых кон-  
струкциях стоимость антикоррозионной защиты резко снижается, если болтовые или заклепочные со-  
единения заменяют сварными переходниками) [17];

для выполнения надежных соединений между легкими алюминиевыми корпусами и долговечными стальными ходовыми частями при произ-  
водстве грузовиков и железнодорожных вагонов; при производстве алюминия (для получения переходных соединений, алюминиевых шин и стальных анодов и катодов, свободных от потерь энергии на контакте) [18];

для получения герметичных муфтовых соеди-  
нений труб из алюминия и нержавеющей стали, используемых в основном в криогенной промыш-  
ленности.

Таким образом, плакирование взрывом явля-  
ется высокоуниверсальной и надежной техно-  
логией для изготовления крупных плакированных плит и металлических свариваемых переходни-  
ков. Исходя из характеристик получаемых изде-  
лий плакирование взрывом превосходит такие альтернативные процессы, как соединение горя-  
чей прокаткой и дуговая наплавка. Плакирование

взрывом главным образом используется при из-  
готовлении коррозионно- или износостойкого оборудования для различных отраслей промыш-  
ленности.

1. *Blazynski T. Z.* Explosive welding, forming and compaction. — Essex: Applied Science publ. Ltd., 1983.
2. *Holtzman A. H., Cowan G. R.* Bonding of metals with explosives // Welding Res. Coun. Bull. — 1965. — № 104, Apr.
3. *Pat. 3137937 US.* Explosive bonding / G. R. Cowan, J. J. Douglass, A. H. Holtzman. — Publ. 1964.
4. *Pocalyko A.* Explosively clad metals // Encyclopedia of Chemical Techn. — 1981. — 15. — P. 275–296.
5. *Ryabov V. R., Dobrushin L. D., Moon J. G.* Welding of bi-  
metals // Welding and applied processes series / Ed. B. E. Paton. — Kiev: E. O. Paton Electric Welding Institute, 2003.
6. *Banker J. G., Reineke E. G.* Explosion welding // ASM Handbook. — 1993. — 6. — P. 303–305.
7. *Patterson A.* Fundamentals of explosion welding // Ibid. — P. 160–164.
8. *Smith L. M., Celant M.* Practical handbook of cladding technology. — Edmonton, Alberta: CA, CASTI Publishing, Inc., 1998.
9. *Banker J. G.* Try explosion clad steel for corrosion protection // Chemical Eng. Progress, AICHE. — 1996. — July. — P. 40–44.
10. *Laermans J., Banker J.* Large titanium clad pressure vessels, design, manufacture and fabrication issues // Corrosion solutions conf., Wah Chang, Sept. 2003.
11. *Banker J. G., Cayard M. S.* Evaluation of stainless steel explosion clad for high temperature, high pressure hydrogen service // Proc. of hydrogen in metals conf., Vienna, Austria, Oct. 1994.
12. *Young G. A.* Explosion clad works for reactors // Hydrocarbon Eng. — 2005. — March. — P. 109–110.
13. *Banker J. G., Winsky J. P.* Titanium/steel explosion bonded clad for autoclaves and vessels // Proc. of ALTA 1999 autoclave design & operation symp., Melbourne, Australia, May, 1999.
14. *Banker J. G.* Commercial applications of zirconium explosion clad // J. Testing and Evaluation, ASTM. — 1996. — P. 91–95.
15. *Frey D., Banker J.* Recent successes in tantalum clad pressure vessel manufacture // Corrosion solutions conf., Wah Chang, Sept. 2003.
16. *Young G. A., Banker J. G.* Explosion weld clad for magnesium melting crucibles // TMS conf., San Diego, CA, Febr. 2003.
17. *McKinney C. R., Banker J. G.* Explosion bonded metals for marine structural applications // Marine Techn., Society of Naval Architects and Marine Eng. — 1971. — July. — P. 285–292.
18. *Banker J. G., Nobili A.* Aluminum-steel electric transition joints, effects of temperature and time upon mechanical properties // Light Metals 2002 (The Minerals, Metals, & Materials Society). — 2002. — P. 439–445.

The explosion welding technology (EXW) was developed in several facilities around the world, primarily in the 1960's. Since then the application of the technology to make explosion cladding technology is a proven, robust, cost effective and highly versatile process for manufacturing clad plates. It is suitable for manufacture of clad of virtually any combination of commonly used industrial metals. Today explosion welded clad plates are used in broad range of industrial applications. The technology has a clear value niche in today's industrial world.

Поступила в редакцию 04.08.2009