УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-11-246-46-52

О. Л. Первухина, канд. техн. наук, И. В. Денисов, канд. техн. наук***ДВУХСЛОЙНЫЕ СТАЛИ ДЛЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ***ИСМАН им. А. Г. Мерджанова РАН, г. Черноголовка, opervukhina@mail.ru*** ООО «Битруб Интернэшнл», г. Красноармейск, bitrub@mail.ru*

В работе рассмотрены основные методы получения и области применения крупногабаритного биметалла: пакетная прокатка, электродуговая наплавка, электрошлаковая наплавка с последующей прокаткой, сварка взрывом. На основании результатов сертификационных испытаний листов двухслойных сталей, полученных сваркой взрывом, и опыта производства биметалла показана перспективность этой технологии для ответственных металлоконструкций нефтехимического и атомного машиностроения. Обоснована универсальность промышленной технологии сварки взрывом, позволяющей обеспечить процесс образования соединения биметаллов широкой номенклатуры со 100% сплошностью соединения как одного листа, так и крупнотоннажных партий в несколько сотен тонн и практически не ограниченных размеров. Представлены особенности термообработки различных биметаллов после сварки взрывом.

Ключевые слова: крупногабаритный биметалл, свойства, сварка взрывом, термообработка, коррозионностойкая сталь, прочность соединения

*O. L. Pervukhina, I. V. Denisov****TWO-LAYER STEEL FOR CRITICAL METAL STRUCTURES***Merzhanov Institute of Structural Macrokinecs and Materials Science RAS,**Chernogolovka, opervukhina@mail.ru*** Bitrub International, Krasnoarmeysk, bitrub@mail.ru*

The paper discusses main methods for obtaining and application of large-sized bimetal: batch rolling, electric arc welding, electroslag surfacing with subsequent rolling, explosion welding. Test results of double-layer steels sheets and experience in bimetal production prove this technology availability for critical metal structures in petrochemical and nuclear engineering or shipbuilding. The universality of the industrial explosion welding allows production of wide range bimetal compounds of 100% integrity both for a single sheet and large-tonnage lots (several hundred tons) and practically unlimited sizes. The features of heat treatment for various bimetals after explosion welding are presented.

Keywords: large-sized bimetal, properties, explosion welding, heat treatment, corrosion-resistant steel, joint strength

В настоящее время в стране поставлена задача создания современного машиностроения, основанного на импортозамещающих технологиях. Для этих целей создаются мощные государственные корпорации по важнейшим отраслям: атомной, нефтехимической, судостроительной, авиационной и др. Развитие этих отраслей немыслимо без новых современных материалов, к которым относятся многослойные композиционные металлические материалы. Многие проблемы позволяет решить использование биметаллов [1 ... 6], объединяющих в одном материале трудно совместимые свойства: высокую конструкционную прочность и технологичность основного слоя со специфиче-

скими свойствами тонкого плакирующего слоя, например, коррозионную стойкость, электропроводность, износостойкость и т.п. Применение многослойных материалов позволяет повышать надёжность и долговечность большой номенклатуры изделий, разработать принципиально новые конструкции узлов машин, а также экономить дефицитные и дорогостоящие материалы [7]. Разнообразие агрессивных сред в современных отраслях промышленности вызывает необходимость использования для плакирующего слоя биметаллов самых различных сталей и сплавов, а также цветных металлов.

Цель статьи: рассмотреть основные методы получения и области применения

крупногабаритного биметалла и на основании результатов сертификационных испытаний листов двухслойных сталей, полученных сваркой взрывом, показать перспективность этой технологии для ответственных металлоконструкций нефтехимического и атомного машиностроения.

Основными задачами в технологии производства биметаллических материалов являются создание прочного соединения составляющих по всей поверхности контакта при заданном соотношении толщины слоев, формирование требуемых структуры и свойств каждого из слоев и биметалла в целом.

Методы производства биметаллов

Основными методами производства биметаллов на основе стали являются:

1. Методы, основанные на расплавлении плакирующего слоя;
2. Методы, основанные на образовании соединения слоёв в твёрдой фазе в процессе горячей прокатки;
3. Методы, основанные на использовании энергии взрыва для получения прочного соединения слоёв в твёрдой фазе.

К методам, основанным на расплавлении плакирующего слоя, относится электродуговая наплавка в различных ее модификациях (ручная, полуавтоматическая под флюсом или в атмосфере защитных газов, автоматическая под флюсом, порошковой проволокой и др.). Преимуществами метода является универсальность в отношении формы наплавляемой поверхности; возможность наносить покрытия из твердых сплавов, не допускающих обработку давлением. Его недостатками является: высокая энергоёмкость процесса наплавки, связанная с необходимостью расплавления наплавочных материалов; разнотолщинность наплавленного слоя, ведущая к перерасходу

сварочных материалов; недостаточно ровная поверхность наплавки, часто требующая зачистки и шлифования; необходимость нанесения нескольких слоев для подавления эффекта разбавления наплавленного металла основным; значительная трудность, а часто невозможность наплавки в тех случаях, когда между металлом наплавки и основанием возможно образование хрупких интерметаллидных прослоек; высокий уровень напряжений и деформаций из-за разницы коэффициентов теплового расширения и усадки расплавленного металла.

Методы, основанные на образовании соединения слоёв в твёрдой фазе в процессе горячей прокатки, получили наибольшее распространение в мировой практике (Англии, США, Франции, ФРГ, Швеции, Японии и России) при производстве биметаллического листового проката с основой из стали. Сущность метода заключается в том, что на заготовку (сляб) из перлитной или низколегированной стали с хорошо обработанной и обезжиренной поверхностью укладывается плакирующий лист из высоколегированной стали. Производится герметизация пакета по периметру. Пакет перед прокаткой нагревают до температур 1150...1250 °С, при этом происходит растворение и восстановление окислов на всех поверхностях герметичного объема. Последующая прокатка на толстолистовых станах с величиной обжатия не менее 60% приводит к схватыванию - образованию металлических связей между контактными поверхностями металлов. В этом случае физико-механические свойства и структура основного и плакирующего слоёв формируются в процессе горячей прокатки пакетов и зависят от степени обжатия пакетов. Структура и прочностные характеристики зоны соединения определяются металлургическими процессами, в частно-

сти, взаимной диффузией, приводящей к образованию эвтектических и хрупких интерметаллидных прослоек. Отличия между методами производства биметалла пакетной прокаткой состоят в конструкции пакетов (симметричные, несимметричные, с крышкой и т.д.), в применении способа защиты контактной поверхности от окисления в процессе нагрева под прокат (использование геттеров, вакуумирования), в применении различных материалов подслоя, обеспечивающего снижение степени перераспределения углерода в граничной зоне соединения слоев. Метод эффективен при производстве крупнотоннажных партий, однако при изменении марки биметалла необходимо перестраивать металлургическое оборудование.

Методом, основанным на использовании энергии взрыва для получения прочного соединения слоёв в твёрдой фазе, является сварка взрывом. Относительная простота процесса, возможность соединять с высокой прочностью практически любые металлы и сплавы на неограниченных плоских и криволинейных поверхностях и возможность проводить работы на первых этапах освоения без значительных капитальных затрат с использованием простейшего оборудования определили его быстрое развитие. Гибкость процесса, то есть переход от производства одного типа биметалла к другому не требует для большинства пар металлов кардинального изменения технологии.

Непосредственное плакирование взрывом позволяет наряду с листами (слябами, брамами) плакировать плоские и пространственные, катаные, кованные и литые заготовки переменной толщины по всей поверхности или по ее части. При этом толщина основного слоя не ограничивается: по существу, с ее увеличением процесс плакирова-

ния облегчается и снижается его стоимость. В процессе сварки взрывом в зоне соединения вследствие интенсивной пластической деформации происходит наклёп и фиксируется высокий уровень остаточных напряжений, а листы имеют значительное отклонение от плоскостности. Поэтому двухслойные листы после сварки взрывом необходимо подвергать термообработке для снятия остаточных напряжений и правке на вальцах или прессе для обеспечения заданной неплоскостности на 1 м длины двухслойных листов. К недостаткам сварки взрывом можно отнести необходимость наличия специальных полигонов. С учетом того, что при сварке крупногабаритных листов заряд может достигать 1000 кг и более, требуется принимать меры для гашения воздушной ударной волны. Кроме того, в этом методе толщина плакирующего слоя, как правило, ограничивается 20-25 мм. С уменьшением толщины основного листа менее 20 мм экономические преимущества непосредственного плакирования уменьшаются, так как растет удельная площадь плакируемой поверхности на единицу массы полученного биметалла. В этом случае целесообразнее применять биметалл, полученный методом пакетной прокатки или сваркой взрывом с последующей прокаткой.

Следует отметить, что при получении биметаллов сваркой взрывом слои металлов, из которых они состоят, сохраняют свойства, которыми они обладали до соединения в биметалле. Основные преимущества сварки взрывом, кроме отмеченных выше, возможность получения прочных соединений практически любых металлов и сплавов без ограничений по площади заготовок, относительная простота процесса и высокая производительность.

Области применения биметаллов для ответственных металлоконструкций.

На сегодняшний день в России нефтехимическое машиностроение является основным массовым потребителем биметаллов. Двухслойная сталь применяется для изготовления смесителей, реакторов отгонки бензина из сырой нефти, реакторов для рафинирования, теплообменников, отстойников, насосов, ректификационных колонн, коксовых камер и другого оборудования, работающего в средах сернистой нефти, мазутов, гудронов, газосырьевых и газопродуктовых смесей. Оборудование работает при одновременном воздействии давления, температуры и агрессивной среды, поэтому для основного слоя используются различные конструкционные углеродистые и низколегированные стали, а для плакирующего слоя коррозионностойкие стали и сплавы, а также сплавы на основе титана и меди. По данным работы [8] наибольшее применение получили двухслойные листы с плакирующим слоем из хромистых, хромоникелевых и хромоникельмолибденовых сталей. Для изготовления аппаратов, работающих в большинстве органических соединений в таких средах, как растворы азотнокислых, сернокислых и хлористых солей, сухой хлор, сернистый и углекислый газы применяются двухслойные стали с плакирующим слоем из сталей типа 08X18H10T. Для изготовления аппаратуры, работающей в сильноагрессивных средах: горячих растворах сернистой и фосфорной кислот, кипящих растворах уксусной, щавелевой и муравьиной кислот и в растворе серной кислоты при повышенных температурах используются биметаллы с плакирующим слоем из хромоникельмолибденовых сталей. В особо агрессивных средах, когда коррозионная стойкость указанных сталей оказывается недостаточной, целесо-

образно применять двухслойную сталь с плакирующим слоем из сплавов на основе никеля, титана и других цветных металлов и сплавов.

Атомное машиностроение в последние годы развивается особенно интенсивно. В 70-80 годы прошлого столетия применительно к атомному машиностроению были проведены работы по исследованию физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств двухслойных сталей, полученных сваркой взрывом. Систематические исследования прочностных и служебных характеристик биметалла с изучением его механических свойств при статическом, ударном и циклическом нагружении, при повторных теплосменах, а также испытания на коррозионную стойкость были обобщены в работе [2]. Исследования показали, что биметалл, полученный сваркой взрывом, обладает комплексом свойств, позволяющим его использовать в конструкциях ответственного назначения в атомном, энергетическом, химическом, нефтехимическом и других отраслях современного машиностроения.

В атомном машиностроении перспективно использовать крупногабаритные листовые биметаллы толщиной до 120 мм и шириной до 4 м длиной до 13 метров, полученные сваркой взрывом при изготовлении:

- теплообменного оборудования - трубные решётки конденсаторов, плакированные титаном или хромоникельмолибденовой сталью;
- корпуса парогенераторов, ёмкости САОЗ (системы аварийного охлаждения зоны), сепараторы пара и другие сосуды, в которых требуется защита от коррозии;
- хранилищ для кубового остатка ЖРО (жидких радиоактивных отходов) с использованием нового многослойного металличе-

ского материала с "протекторной питтинг-защитой" [9].

Корпуса атомных ледоколов, работающих при низких температурах (часто в условиях сложной ледовой обстановки), изготавливаются из высокопрочных корпусных сталей с пределом текучести 390 - 590 МПа. Известно, что надежность этих сталей при эксплуа-

001-21414987-2012 «Лист стальной двухслойный коррозионно-стойкий, изготовленный методом сварки взрывом». Для обеспечения требований ТУ (см. таблицу) был проведен комплекс исследований особенностей процесса образования соединения при сварке взрывом крупногабаритных листов (более 9 м²).

Результаты сертификационных испытаний листов двухслойных сталей

№	Марка, размеры биметалла, мм	Свойства соединения				Свойства основного металла		
		σ _{отр} , МПа	σ _{ср} , МПа	Боковой изгиб, град.	Из- гиб, град.	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %
Требования нормативно- технической документации		196	196	80	120	≥ 450	≥ 265	≥ 22
1	22К+08Х18Н10Т 110(105+5)х4050х4700	485	292	80	160	454	271	26
		578	423			505	320	31
2	22К+08Х18Н10Т 60(55+5)х2500х10000	464	403	80	160	440	330	26
		686	450			515	385	34
3	22К+08Х18Н10Т 80(75+5)х2550х4300	452	488	80	160	432	320	26
		608	606			479	330	33
4	09Г2С+12Х18Н10Т 32(28+4)х2000х12900	557	286	80	160	493	282	29
		565	395					
5	12ХМ+12Х18Н10Т 30(26+4)х1400х10400	449	321	80	160	508	275	27
		581	480					

тации определяется способностью материала сопротивляться разрушению при зарождении трещин вследствие коррозии и их распространении. Для повышения надёжности целесообразно защитить поверхность корпуса судна от воздействия агрессивной среды путём нанесения на поверхность стали слоя пластичной аустенитной коррозионностойкой стали, что одновременно предотвратит зарождение трещин в поверхностном слое.

Биметаллы, полученные сваркой взрывом

Высокие требования к качеству определяются техническими условиями, в частности ТУ 27.32.09.010-2005 «Сталь листовая двухслойная коррозионно-стойкая, изготовленная методом сварки взрывом» и ТУ 0993-

При соударении в режиме сварки взрывом в сварочном зазоре впереди точки контакта образуется ударно-сжатый газ, создаются высокие температуры и давление, происходят сложные физико-химические процессы, прямое наблюдение за которыми затруднено из-за наличия воздушной ударной волны и продуктов детонации. Теоретическое исследование процессов, идущих в сварочном зазоре при сварке взрывом крупногабаритных листов [10, 11] позволили обосновать механизм образования соединения металлических слоев с учетом аэродинамики потока ударно-сжатого газа впереди точки контакта. Экспериментально при производстве крупногабаритных двухслойных листов установлено, что для обеспечения прочного соединения в начале процесса

Рис. 1. Биметаллические днища после штамповки в ООО "Зенитхиммаш"

сварки взрывом, исключения начальных и краевых непроваров, необходимо к моменту начала сварки и в краевых зонах обеспечить требуемые параметры ударно-сжатого газа для очистки и активации свариваемых поверхностей [12]. Разработана методика расчетной оценки определения максимальных габаритов свариваемых листов, обеспечивающая качественную сварку взрывом по всей поверхности. Методика подтверждена экспериментально на листах шириной от 1500 до 4000 мм и длиной от 2000 до 13000 мм путем исследования макро и микрошлифов и испытаниями на отрыв плакирующего слоя по всей длине листа, а также ультразвуковой дефектоскопией [13].

С учётом результатов исследований была усовершенствована технология, по которой были изготовлены двухслойные заготовки марки 22K+08X18H10T размерами 110(105+5)х4050х4600 мм для производства днища ёмкостей САОЗ Ленинградской АЭС [12], двухслойные листы для изготовления ёмкостей САОЗ Нововоронежской АЭС (для обечаек листы размерами 60(55+5)х2500х9900 мм). Свойства биметалла указаны в таблице.

В таблице приведены также результаты сертификационных испытаний крупногаба-

Рис. 2. Биметаллические обечайки в процессе изготовления емкостей САОЗ в АО "Моршансхиммаш"

ритных листов (площадь 9-12 м²) двухслойных сталей марки 09Г2С+12Х18Н10Т и 12ХМ+12Х18Н10Т, произведенных для предприятий нефтехимической отрасли.

Качество биметалла после термической обработки и правки оценивали по сплошности сцепления слоёв методом ультразвуковой дефектоскопии, прочности соединения на изгиб, отрыв и срез. Качество двухслойных листов соответствовало требованиям ТУ с обеспечением 100% сплошности соединения слоёв. Исходные материалы (слои биметалла) в процессе сварки взрывом и последующей термообработки и правки не изменили своих свойств, а технология обеспечила высокую производительность процесса - 32-36 м² в смену практически при любых погодных условиях. Горячая штамповка днищ (рис. 1) не вызвала затруднений. На рис. 2 показан процесс производства из двухслойных обечаек ёмкостей САОЗ Нововоронежской АЭС.

В процессе сварки взрывом в зоне соединения вследствие интенсивной пластической деформации происходит наклёп и фиксируется высокий уровень остаточных напряжений, а листы имеют значительное отклонение от плоскостности. Поэтому двухслойные листы после сварки взрывом

необходимо подвергать термообработке для снятия остаточных напряжений и последующей правке на вальцах или прессе для обеспечения заданной не плоскостности на 1 м длины двухслойных листов. Опытным путём установлено, что оптимальная температура термической обработки для биметалла сталь + коррозионно-стойкая сталь является нагрев до температуры 720 °С - 750 °С и длительностью выдержки в зависимости от толщины. Высокотемпературная обработка с нагревом выше 900 °С интенсифицирует процессы диффузии в соединении слоёв, что положительно сказывается в выравнивании свойств соединения. Однако ряд технических требований при изготовлении оборудования не рекомендует высокотемпературную обработку из-за изменения свойств основного металла.

Заключение

Промышленная технология сварки взрывом обеспечивает получение высококачественного двухслойного листа с основой из различных конструкционных сталей и плакирующего слоя из коррозионностойких сталей и сплавов с прочностью соединения на отрыв и срез, превышающей требования нормативно-технической документации. Механические свойства основного металла и плакирующего слоя в процессе сварки взрывом и последующих термических обработок и технологических переделов (штамповка, гибка и т.п.) не претерпевают существенных изменений. Универсальность технологии, отсутствие специального оборудования, обеспечивающего процесс образования соединения, делает возможным одновременно производить разные марки биметаллов широкой номенклатуры от одного листа до крупнотоннажных партий в несколько сотен

тонн и практически не ограниченных размеров.

Библиографический список

1. Седых, В. С. Сварка взрывом и свойства сварных соединений / В. С. Седых, Н. Н. Казак – М.: Машиностроение, 1971. – 70 с.
2. Плакирование стали взрывом: Структура и свойства биметалла / [А. С. Гельман и др.]; под ред. проф., д-ра техн. наук А. С. Гельмана. – Москва : Машиностроение, 1978. – 191 с.
3. Конон, Ю. А. Сварка взрывом / Ю. А. Конон, Л. Б. Первухин, А. Д. Чудновский – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.
4. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин – М.: "Машиностроение", 2005. – 544 с.
5. Петушков, В. Г. Применение взрыва в сварочной технике / В. Г. Петушков – Киев: «Наукова думка», 2005. – 754 с.
6. Банкер, Дж. Г. Промышленное применение сварки взрывом (Обзор) / Дж. Г. Банкер // Автоматическая сварка. – 2009. – №11. – С.49-53.
7. Рабкин, Д. М. Сварка разнородных материалов / Д. М. Рабкин, Р. Р. Рябов, С. М. Гуревич – Киев: «Техника», 1975. – 206 с.
8. Коррозионно-стойкие биметаллы с прочным сцеплением слоев для нефтехимической промышленности и других отраслей / И. Г. Родионова, А. А. Павлов, А. И. Зайцев, А. В. Голованов, А. А. Быков, А. А. Шарипов, О. Н. Бакланова – ЗАО Металлургиздат Москва, 2011. – 292 с.
9. Евразийский патент № 016878 ЕАПВ С23F 13/06 В 32В 7/02. Многослойный материал повышенной коррозионной стойкости (варианты) и способы его получения / А. Е. Розен, И. С. Лось, Ю. П. Перелыгин, Л. Б. Первухин, Ю. А. Гордополов, Г. В. Кирий, П. И. Абрамов, С. Г. Усатый, Д. Б. Крюков, О. Л. Первухина, И. В. Денисов, А. А. Розен. – 2012.
10. Определение параметров ударно-сжатого газа в сварочном зазоре впереди точки контакта при плакировании взрывом / С. Ю. Бондаренко, Д. В. Рихтер, О. Л. Первухина, Л. Б. Первухин // Автоматическая сварка. – 2009. – № 11 (679). – С. 46-48.
11. Первухин, Л.Б. Очистка свариваемых поверхностей от окислов и загрязнений и их активация в процессе сварки взрывом / Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина, С. Ю. Бондаренко // Автоматическая сварка. – 2010. – № 7 (686). – С. 46-49.
12. Первухин, Л. Б. Взаимодействие ударно-сжатого газа в сварочном зазоре со свариваемыми поверхностями при сварке взрывом / Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина // Сварочное производство. – 2016. – № 6. – С. 20-25.
13. К вопросу о предельных размерах листов получаемых сваркой взрывом / Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина, И. В. Денисов, Т. А. Шишкин, Д. В. Ноняк // Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – Волгоград, 2016. – № 10 (189). – С. 76-86.