

О.Л. Первухина, к.т.н., в.н.с., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук», e-mail: opervukhina@mail.ru; Л.Б. Первухин, д.т.н., профессор, заведующий лабораторией, Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина», e-mail: bitrub@mail.ru

СВОЙСТВА КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ БИМЕТАЛЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ, ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ОБОРУДОВАНИЯ В НЕФТЕХИМИЧЕСКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

В работе дан анализ основных областей применения коррозионно-стойких биметаллов в нефтехимическом машиностроении и методов их производства. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие высокое качество двухслойных листов, произведенных по промышленной технологии, с основой из различных конструкционных сталей и плакирующего слоя из коррозионно-стойких сталей. Образцы для испытаний отбирали не только с концевой части двухслойных листов, но и по площади обечаек и днищ после горячей штамповки (из мест установки штуцеров и лазерных отверстий). Показано, что прочностные свойства, полученные на образце, вырезанном из конечного участка, закономерно относятся ко всей поверхности соединения при условии качественной сварки всей контактной поверхности по результатам ультразвукового контроля. Механические свойства основного металла и плакирующего слоя в процессе сварки взрывом и последующих термических обработок и технологических переделок (штамповка, гибка и т.п.) не претерпевают существенных изменений.

Ключевые слова: крупногабаритный биметалл, конструкционные и коррозионно-стойкие стали, сварка взрывом, прочность соединения, режим термообработки.

НАЗНАЧЕНИЕ БИМЕТАЛЛОВ

Биметаллы, состоящие из двух и более слоев металлов, соединенных между собой прочной неразъемной металлической связью, представляют особый класс материалов с широким комплексом эксплуатационных и технологических характеристик. Такие материалы обладают комплексом ценных свойств: конструкционной прочностью основного и коррозионной стойкостью плакирующего слоя, коррозионной стойкостью и жаропрочностью, а также другими сочетаниями свойств. Разнообразие агрессивных сред в современных отраслях промыш-

ленности вызывает необходимость использования для плакирующего слоя биметаллов самых различных сталей и сплавов, а также цветных металлов. По данным работы [1], наибольшее применение получили двухслойные листы с плакирующим слоем из хромистых, хромоникелевых и хромникельмолибденовых сталей. Двухслойные стали с плакирующим слоем из сталей типа 08X18H10T применяются для изготовления аппаратов, работающих в большинстве органических соединений, в таких средах, как растворы азотнокислых, сернокислых и хлористых солей, сухой хлор, сернистый и углекислый

газы. Плакированные хромникельмолибденовыми сталями листы используются 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. В особо агрессивных средах, когда коррозионная стойкость указанных сталей оказывается недостаточной, целесообразно применять двухслойную сталь с плакирующим слоем из сплавов на основе никеля, титана и других цветных металлов и сплавов.

Таблица 1. Результаты сертификационных испытаний листов двухслойных сталей

Марка биметалла	Свойства соединения				Свойства основного металла			
	$\sigma_{отр}$, МПа	$\sigma_{срез}$, МПа	Изгиб 180 град.	Боковой изгиб 80 град.	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ ,%	KCV при 20 °С, Дж/см ²
09Г2С+АISI 410S (08Х13)	297–347	250–345	+	+	462	352	25	–
09Г2С+ АISI 321 (08Х18Н10Т)	557–565	286–395	+	+	493	282	29	при 20 °С 290–325; при –70 °С 71–219
12ХМ+АISI 321 (12Х18Н10Т)	449–581	321–480	+	+	508	275	27	
09Г2С+АISI 316Ti (10Х17Н13М2Т)	430–470	350–370	+	+	480–530	310–360	27–32	при 40 °С 210–250
09Г2С+АISI 316L (03Х17Н13М2)	480–510	330–350	+	+	500–520	320–420	31–32	при 40 °С 210–250
12ХМ+АISI 316Ti (10Х17Н13М2Т)	460–520	390–520	+	+	490–520	–	–	при 20 °С 90–210

По способу производства биметаллы можно разделить на биметаллы, в которых неразъемная металлическая связь между слоями получена сваркой в жидкой фазе (наплавкой) и в твердой фазе (сварка давлением). Применение способов первой группы возможно только при изготовлении биметаллов с близкими по химическому составу слоями. Свойства биметалла, определяемые составом и свойствами лакирующего слоя и свойствами основного слоя, формируются в процессе производства. Наплавленный металл в процессе расплавления и образования сварного соединения изменяет свой химический состав и свойства, а граница соединения представляет собой ряд переходных структур, обладающих подчас низкими механическими свойствами. В настоящее время в России методом электрошлаковой наплавки с последующей прокаткой изготавливают в основном биметаллы с лакирующим слоем из хромистых сталей типа 08Х13 по технологии ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» и ООО «Институт биметаллических сплавов». Получение биметаллов из металлов с малой взаимной растворимостью на уровне твердых растворов наплавкой затруднено.

Более широкие возможности для получения коррозионно-стойких биметаллов имеет метод горячей прокатки вакуумируемых пакетов. Физико-механические свойства и структура основного и лакирующего слоев формируются в процес-

се горячей прокатки и зависят от степени обжатия пакетов. Структура и прочностные характеристики зоны соединения определяются металлургическими процессами, в частности взаимной диффузией, приводящей к образованию эвтектических и хрупких интерметаллидных прослоек. Существенным недостатком метода является необходимость перестраивать металлургическое оборудование при изменении марки биметалла. Метод эффективен при производстве крупнотоннажных партий.

Методом, практически не изменяющим свойства исходных составляющих биметалла, является сварка взрывом. Это важный фактор, который позволяет до изготовления биметалла обеспечить требуемые конструкционные свойства основного слоя (механические свойства, категорию прочности, структуру, наличие включений, химический состав) и специальные свойства лакирующего слоя (химический состав, стойкость к МКК и т.п.). Сварка проходит в твердой фазе без значительного разогрева металла за промежуток времени порядка десятков микросекунд без взаимной диффузии свариваемых металлов [2]. Применение этого способа дает возможность получить сварное соединение на площади от нескольких квадратных миллиметров до десятков квадратных метров. Для нужд нефтехимического комплекса изготавливают крупногабаритные двухслойные листы толщиной 12–200 мм, шириной 500–4000 мм, дли-

ной 500–13 000 мм. Толщина лакирующего слоя может составлять 2–15 мм. Универсальность технологии, отсутствие специального оборудования, обеспечивающего процесс образования соединения, делают возможным одновременно производить разные марки биметаллов широкой номенклатуры – от одного листа до крупнотоннажных партий в несколько сотен тонн.

ТРЕБОВАНИЯ К БИМЕТАЛЛАМ, ПОЛУЧЕННЫМ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

Двухслойные листы с основным слоем из углеродистой, низколегированной, легированной стали и лакирующим слоем из коррозионно-стойкой стали или сплава, полученные методом сварки взрывом, соответствуют требованиям ГОСТ 10885-85. Для учета специфических требований различных областей применения двухслойных сталей и особенностей процесса их производства сваркой взрывом разработаны, согласованы в установленном порядке и введены в действие следующие технические условия:

- 1) ТУ 27.32.09.010-2005 «Сталь листовая двухслойная коррозионно-стойкая, изготовленная методом сварки взрывом»;
- 2) ТУ 0993-001-21414987-2012 «Лист стальной двухслойный коррозионно-стойкий, изготовленный методом сварки взрывом»;
- 3) ТУ 27.81.09.009-2005 «Заготовки двухслойные «сталь – титан», изготовленные методом сварки взрывом».

Таблица 2. Результаты испытаний прочности соединения двухслойных листов

Сосуд	Место отбора проб	$\sigma_{отр}$, МПа	$\sigma_{срез}$, МПа	Угол загиба, 180 град.
Первый	Конечные зоны листа до термообработки	480–670	395–430	+
	Конечные зоны листа после термообработки	420–660	400–420	+
	Пробки из обечайки	435–660	385–605	+
Второй	Конечные зоны листа	265–510	390–475	+
	Пробки из обечайки	465–570	390–500	+

Примечание: В таблице приводятся предельные значения полученных данных по 20 пробкам из каждой обечайки

С учетом конструкции элементов аппаратов перед плакированием сваркой взрывом допускается выполнять укрупнение листов для плакирующего слоя электродуговой сваркой с зачисткой и контролем качества шва.

Механические свойства двухслойных листов должны соответствовать требованиям соответствующих стандартов на сталь марок основного слоя в зависимости от требуемой категории. Плакирующий слой из коррозионно-стойких сталей и сплавов (за исключением ферритных сталей, никеля и молибдена) не должен быть склонен к межкристаллитной коррозии при испытании по ГОСТ 6032-2003. Сплошность соединения слоев биметалла контролируется ультразвуковым контролем и механическими испытаниями. По сплошности сцепления слоев двухслойные листы

должны соответствовать классу 0 или 1 по ГОСТ 22727-88. Величина сопротивления срезу при определении прочности соединения слоев в двухслойных листах должна быть не менее 147 МПа. Величина сопротивления отрыву плакирующего слоя от основного слоя должна быть не менее 196 МПа. Прочность сцепления слоев в двухслойных листах определяют испытанием на изгиб на угол 160 градусов и боковой изгиб – на угол 80 градусов.

СВОЙСТВА КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ БИМЕТАЛЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

В процессе сварки взрывом в зоне соединения вследствие интенсивной пластической деформации происходит наклеп и фиксируется высокий уровень остаточных напряжений, а листы имеют значи-

тельное 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 неплоскостности на 1 м длины двухслойных листов. Опытным путем установлено, что оптимальная температура термической обработки для биметалла «сталь – коррозионно-стойкая сталь» является нагрев до температуры 720–750 °С, для биметалла «сталь – титан» – 540 °С с длительностью выдержки в зависимости от толщины. Высокотемпературная обработка с нагревом выше 900 °С интенсифицирует процессы диффузии в соединении слоев, что положительно сказывается в выравнивании свойств соединения. Однако ряд технических требований при изготовлении оборудования не рекомендует высокотемпературную обработку из-за изменения свойств основного металла.

Качество двухслойных листов, изготовленных любым методом, оценивается по результатам 100%-ного ультразвукового контроля (УЗК) сплошности соединения и испытания прочности соединения на отрыв, срез и изгиб. В таблице 1 приведены результаты сертификационных испытаний крупногабаритных листов (площадь 9–12 м²) двухслойных сталей, изготовленных методом сварки взрывом, производства ООО «Битруб Интернэшнл». Все полученные значения соответствуют и даже превышают требования стандартов. При этом образцы для проведения испытаний отбираются из конечных участков от одного листа от партии или от каждого листа по требованию заказчика. В связи с этим встает вопрос: закономерно ли относить прочностные свойства, полученные на образце, вырезанном из конечного участка, ко всей поверхности соединения при условии 100%-ной сплошности соединения по данным УЗК? Для ответа на этот вопрос при изготовлении сосудов из листов двухслойной стали марки

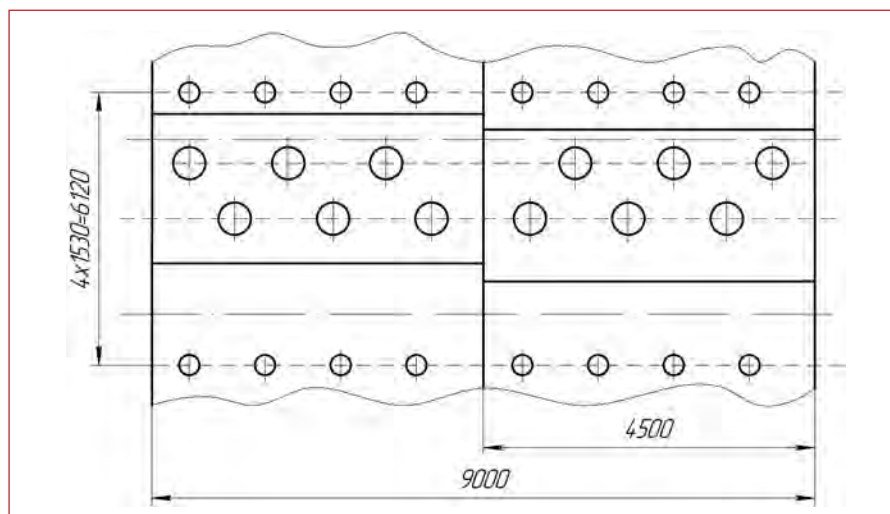


Рис. Схема расположения отверстий для штуцеров и взятия проб из обечайки

22K+08X18H10T размерами 75(70+5) x 3150 x 5000 мм для обечайки (9 листов) и 2630 x 2630 x 90 мм для днищ (4 листа) провели исследование прочности соединения слоев по следующей методике.

1. Из конечных участков от двухслойных листов после сварки взрывом вырезали темплеты, из которых были изготовлены образцы для испытаний прочности соединения и исследования структуры до и после термообработки по режиму, имитирующему нагревы при изготовлении сосуда: аустенизация 1050 °С, стабилизирующий отжиг 900 °С, отпуск 640 °С.

2. Из каждой обечайки было вырезано по 20 пробок из мест установки штуцеров (в соответствии со схемой рисунка), из которых были изготовлены образцы для определения механических свойств основного металла и прочности соединения. Проведены также металлографические исследования и испытания на стойкость к межкристаллитной коррозии (МКК). Кроме того, испытывались отходы, вырезанные из лазерного отверстия днищ.

В таблицах 2 и 3 приведены результаты испытаний прочности соединения двухслойных листов и испытаний основного металла двухслойных листов. Отметим, что прочность на отрыв лакирующего слоя ($\sigma_{отр}$) и на срез лакирующего слоя ($\sigma_{срез}$) представлены предельными значениями полученных данных по 20 пробкам из каждой обечайки. Проведенные исследования (табл. 2) однозначно показали, что прочность соединения на отрыв и срез на всех пробах по площади листа значительно превышает требования ГОСТ 10885-85 и указанных выше технических условий и находятся на уровне прочности основной стали 22К. Следовательно, прочностные свойства, полученные на образце, вырезанном

Таблица 3. Результаты испытаний основного металла двухслойных листов

Сосуд	Место отбора проб	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ , %	φ , :	KCV при 20 °С, Дж/см ²
По ГОСТ 5520-79		255	430–590	22	–	–
Первый	Обечайки	280–320	500–530	25–28	56–64	110–180
	Днища	320–350	540–560	23–25	65,0	80–135
Второй	Обечайки	320–375	535–570	22–28	61,5	110–143
	Днища	–	–	–	–	–

Примечание: В таблице приводятся предельные значения полученных данных по 20 пробкам из каждой обечайки

из конечного участка, закономерно относить ко всей поверхности соединения при условии 100%-ной сплошности соединения по данным УЗК. Данные испытаний таблицы 3 позволяют сделать важный для практики производства вывод, что в процессе технологических переделов, связанных с изготовлением биметалла сваркой взрывом, последующей термической обработкой и штамповкой, свойства основного металла не изменяются. Испытания на МКК выдержали все пробы, что свидетельствует о сохранении антикоррозионных свойств стали 08X18H10T при сварке взрывом и последующих технологических нагревах. Соединение слоев носит волнистый характер. Амплитуда волн – 0,2–0,6 мм. Основной металл в зоне соединения обезуглерожен до чистого феррита в области, захватывающей всю волнистую зону.

Многолетний опыт промышленного производства коррозионно-стойкого биметалла сваркой взрывом позволил сформулировать требования к современному промышленному производству биметалла сваркой взрывом:

- высокое качество, подтвержденное сертификатом, при конкурентной цене;
- круглогодичность производства;
- сжатые сроки выполнения работ, от получения заказа до поставки;
- обеспечение по требованию за-

казчика полного цикла производства, включая термообработку, отделку и проведение испытаний на соответствие требованиям стандартов и технических условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Промышленная технология сварки взрывом обеспечивает получение высококачественного двухслойного коррозионно-стойкого листа с основой из различных конструкционных и лакирующего слоя из коррозионно-стойких сталей со 100%-ной сплошностью соединения по результатам ультразвуковой дефектоскопии и прочностью соединения на отрыв и срез, превышающей требования ГОСТ 10885-85 и технических условий, по всей поверхности крупногабаритного листа. Физико-механические свойства основного металла и лакирующего слоя в процессе сварки взрывом и последующих термических обработок и технологических переделок (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 неограниченных размеров.

Литература:

1. Родионова И.Г., Павлов А.А., Зайцев А.И. и др. Коррозионно-стойкие биметаллы с прочным сцеплением слоев для нефтехимической промышленности и других отраслей. М.: ЗАО «Металлургиздат», 2011. 292 с.
2. Конон Ю.А., Первухин Л.Б., Чудновский А.Д. Сварка взрывом. М.: Машиностроение, 1987. 216 с.