

Сварочная проволока с алюминиевым покрытием

Влияние алюминия на структуру и свойства сварного соединения

Марутьян С. В., к.т.н., Волков Ю. С., инж.,
ООО «Сталюм-Технология»

Известно, что введение алюминия в расплав при разливке стали приводит к ее раскислению. В процессе сварки осуществляется соединение двух стальных изделий посредством оплавления их кромок, при этом происходит заполнение пространства между ними расплавом материала электрода. Предположили, что алюминиевое покрытие на стальной сварочной проволоке способно раскислить наплавляемый металл и тем самым улучшить эксплуатационные свойства сварного шва. Исследования сварки стальных изделий с алюминиевым покрытием показали, что количество алюминия в сварочной ванне определяет эксплуатационные свойства сварного соединения. Алюминий в стали может присутствовать в растворе в виде интерметаллических соединений с железом или оксидов. Количество, дисперсность и форма этих включений будут определять структуру и механические характеристики сварного соединения.

В связи с этим целью настоящей работы является изучение влияния алюминия в сварочной ванне на структуру и эксплуатационные свойства сварного соединения.

Методика подготовки образцов и проведения исследований

Для сварки образцов была использована стальная проволока 08Г2С диаметром 1,2; 1,6; 2,0 мм без покрытия, омедненная и с алюминиевым покрытием, нанесенным погружением в расплав на опытно-промышленной установке. Использовалась алюминированная проволока нескольких диаметров и с различной толщиной покрытия.

Это позволило вводить в сварной шов различное количество алюминия.

Для изготовления образцов сварных соединений использовали стальную лист, его разрезали вдоль направления прокатки на карточки размером 500 x 200 мм. Кромки разделяли по длинной стороне под углом 45°. Сварку производили на отечественном оборудовании типа ПВГ в среде CO₂, режимы сварки приведены в табл. 1.

Карточки после сварки разрезали на заготовки, из которых изготавливали образцы для испытаний на растяжение и на ударную вязкость по ГОСТу 6996.66. Ударную вязкость определили при трех температурах: -20; 0 и +20 °С на копре ПСВ30.

Таблица 1. Режимы полуавтоматической сварки образцов

Толщина образцов, мм	Диаметр проволоки, мм	Число проходов, ед.	Номер прохода	I, А	U, В	Скорость сварки, м/час	Расход газа, л/мин
12,0	1,2	3	1	120-140	22-28	10-11	18-20
			2	120-140	22-28	10-11	
			3	120-140	22-28	10-11	
			4	120-140	22-28	10-11	
12,0	1,6	3	1	120-140	22-28	10-11	18-20
			2	120-140	22-28	10-11	
			3	120-140	22-28	10-11	
			4	120-140	22-28	10-11	
12,0	2,0	3	1	250-270	28-30	19-22	18-20
			2	350-380	30-32	15-18	
			3	250-270	28-30	19-22	

Испытания образцов на растяжение производили при комнатной температуре на машине FRZ 100. Оценку микроструктуры покрытий и образцов сварных соединений производили на микрошлифах. Приготовление микрошлифов производили на станке «LaboPol-6» фирмы «Struers». Микроструктуру образцов изучали на оптическом микроскопе Neophot-21 при увеличениях 250; 500; 1000. Травление микрошлифов производили в 3%-ном растворе HNO₃ в этиловом спирте.

Рентгеноструктурный анализ образцов производили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4 в CoK α -излучении ($\lambda=1,79021 \text{ \AA}$) с Fe-фильтром. Исследование химического состава локальных участков сварных соединений проводили на сканирующем электронном микроскопе LEO-430i с рентгеновским микроанализатором Oxford Instruments, снабженным энергодисперсионным детектором Link ISIS.

Результаты исследований

Изучали структуру различных областей сварного соединения, которые определяют его механические свойства.

Первая область – зона литой структуры; там протекают процессы плавления и кристаллизации материалов электрода и свариваемого металла.

Вторая область – зоны термического влияния; там в результате воздействия высоких температур происходит изменение структуры свариваемого металла. Эта область условно разделяется на зону перегрева, зону нормализации и зоны перекристаллизации и рекристаллизации.

Третья область – зона, где сохраняется структура свариваемого металла (рис. 1).

Определяли механические характеристики сварочной проволоки в исходном состоянии, после нанесения алюминиевого покрытия и алюминированной проволоки в нагартованном состоянии. Результаты испытаний приведены на рис. 2.

Рис. 2

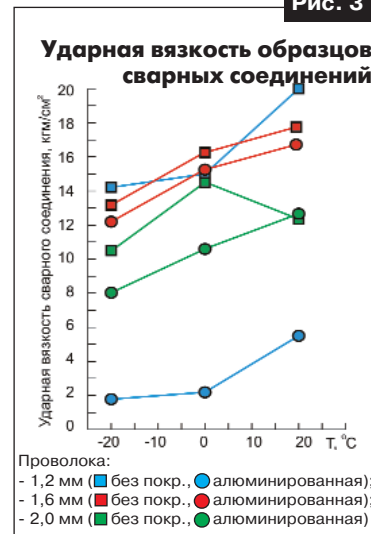


Термическое воздействие на стальную проволоку в результате нанесения алюминиевого покрытия значительно повышает пластичность и снижает ее прочностные характеристики. Это затрудняет подачу проволоки через сварочный аппарат и нарушает непрерывность ее подачи в зону сварки. После нагартовки алюминированной проволоки многократным изгибом она приобретает достаточную жесткость, чтобы с успехом преодолеть трудности подачи ее в зону сварки.

Одним из возможных способов повышения жесткости алюминированной проволоки может служить ее последующее калибровочное волочение.

Проведены испытания образцов, вырезанных из сварного соединения, на растяжение и ударный излом. В результате испытаний на растяжение были определены: предел прочности, предел текучести и относительное удлинение. Эти характеристики механических свойств практически не отличаются у сварных соединений, полученных с помощью омедненной, алюминированной проволоки и проволоки без покрытия. Результаты испытаний на ударную вязкость приведены на рис. 3.

Рис. 3

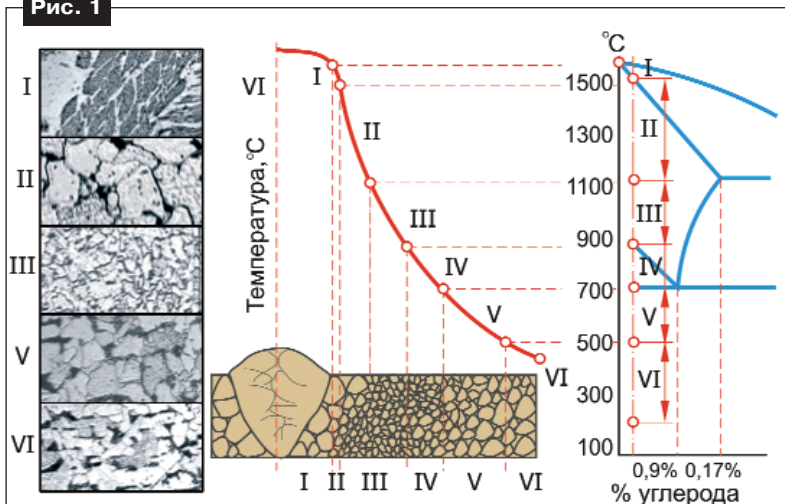


Следует отметить, что ударная вязкость сварных соединений, полученных с помощью сварочной проволоки диаметром 1,2 мм независимо от наличия на ее поверхности покрытия, имела более высокие значения, чем в результате сварки аналогичной проволокой диаметром 1,6 мм и 2,0 мм. Это, по-видимому, связано с тем, что проволока диаметром 1,2 мм является оптимальной для сварки стальных листов толщиной 12 мм.

Ударная вязкость сварного шва, полученного с помощью проволоки диаметром 1,2 мм с алюминиевым покрытием толщиной 20–25 мкм, оказалась значительно ниже аналогичной характеристики сварного соединения, полученного с помощью омедненной проволоки и проволоки без покрытия. Это связано с тем, что проволока после алюминирования стала пластичной, в результате чего застревала в канале сварочного аппарата.

В итоге стабилизировать процесс сварки не удалось. Кроме того, количество алюминия, вводимого в сварочную ванну, в данном случае значительно превысило необходимое для раскисления расплава.

Рис. 1



Избыток алюминия привел к тому, что структура зоны сплавления сварного шва в данном случае отличается грубым дендритным строением. Снижение жидкотекучести наплавляемого железа, содержащего значительное количество алюминия, привело к структурному расслоению зоны сплавления сварного шва. Кроме того, в зоне сварного шва имеются поры, неслошности, неметаллические включения (рис. 4).

Ударная вязкость сварных соединений, полученных сварочной проволокой с алюминиевым покрытием диаметром 1,6 мм, практически не отличается от механических свойств аналогичного соединения, произведенного омедненной проволокой и проволокой без покрытия. Это, повидимому, связано с тем, что проволока после нанесения покрытия подвергалась дополнительной модификации.

Поверхность этой проволоки после нанесения покрытия выглаживали пропусканьем через фильеру. Жесткость проволоки повышали за счет ее холодной деформации в результате многократного изгиба. В итоге ее механические свойства практически соответствовали требованиям стандарта, проволока беспрепятственно перемещалась через канал сварочного аппарата, процесс сварки протекал достаточно стабильно. Уменьшение толщины покрытия после пропускания проволоки через фильеру привело к снижению количества алюминия, вводимого в сварочную ванну, в результате сварки проволокой с алюминиевым покрытием.

Таким образом, был сформирован сплошной сварной шов с минимальным количеством дефектов. Структура зоны сплавления сварного шва в данном случае отличается мелкокристаллическим строением, имеются небольшого размера поры и неметаллические включения (рис. 5).

Однако следует отметить, что даже при уменьшении толщины алюминиевого покрытия на сварочной проволоке до 10–15 мкм количество алюминия, попадающего в сварочную ванну, несколько превышает его концентрацию, необходимую для раскисления стали. Можно предположить, что оптимизация толщины алюминиевого покрытия на сварочной проволоке позволит улучшить структуру и свойства полученного при этом сварного соединения.

Сварка проволокой диаметром 2,0 мм с алюминиевым покрытием толщиной 20–25 мкм показала, что механические характеристики полученного сварного шва оказались несколько ниже, чем у аналогичного шва, произведенного проволокой без покрытия. Это связано с тем, что в результате нанесения алюминиевого покрытия снизились прочностные характеристики проволоки и это не позволило обеспечить непрерывную подачу ее через сварочный аппарат.

Структура зоны сплавления сварного шва мелкая дендритная, имеются отдельные поры и неметаллические включения (рис. 6). Это связано с тем, что количество алюминия в покрытии превысило величину, необходимую для раскисления сварочной ванны.

Механические характеристики сварных соединений, полученных омедненной сварочной проволокой и проволокой без покрытия, практически не отличались друг от друга.

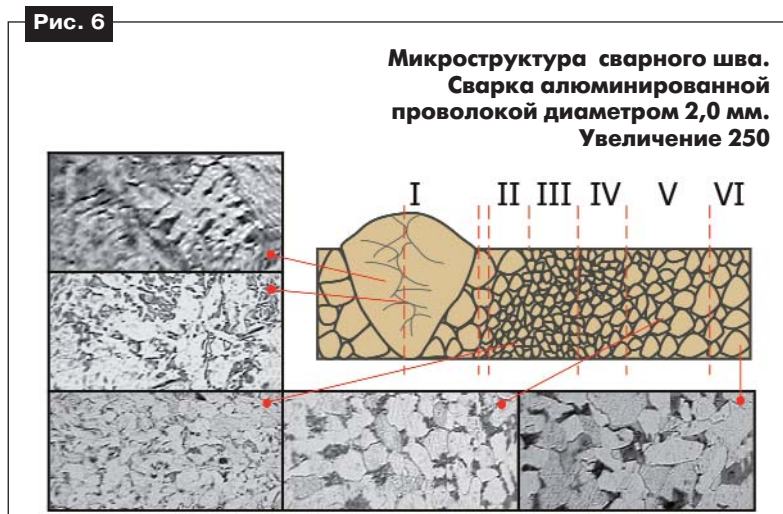
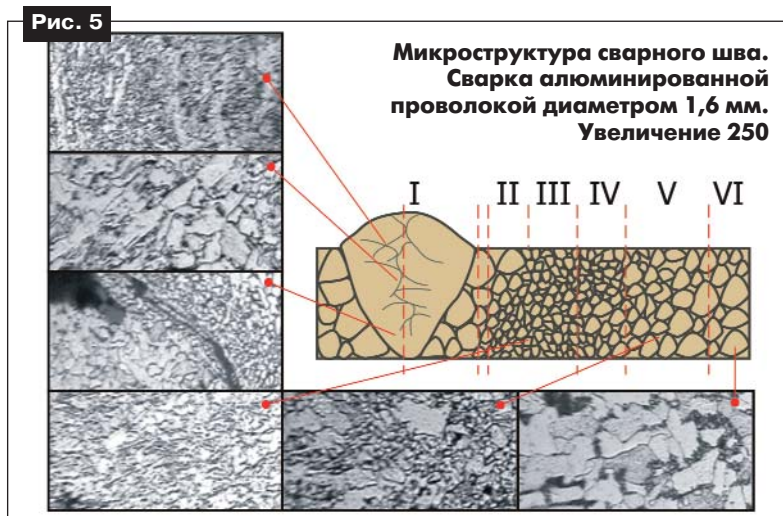
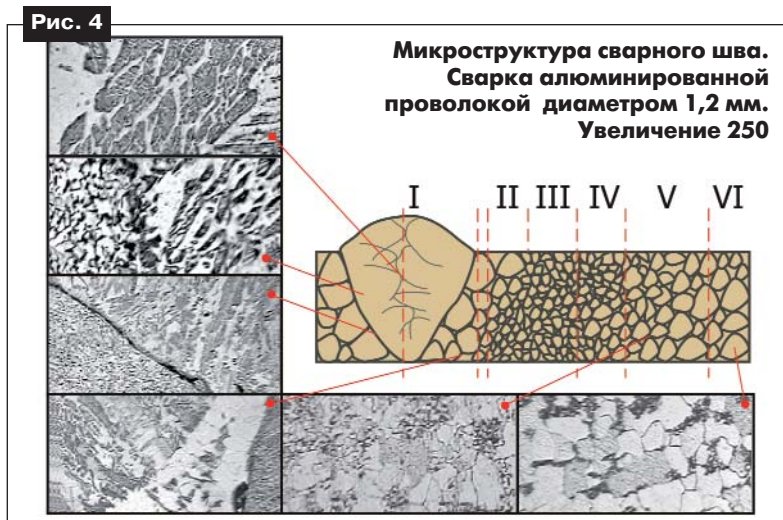


Таблица 2. Содержание алюминия в сварном соединении

Диаметр проволоки, мм	Толщина покрытия, мкм	Расчетное количество алюминия, %	Реальное количество алюминия, %	Количество алюминия для раскисления стали, %	Количество алюминия в сплаве 09Г2С, %
1,2	20–25	1,15	0,92		
1,6	10–15	0,52	0,41	0,12–0,18	0,029–0,046
2,0	25–30	0,67	0,53		

Поверхность излома образцов после испытаний на ударную вязкость изучали с помощью бинокулярной лупы. Типичные поверхности изломов образцов представлены на рис. 7. Снижение ударной вязкости сварных соединений, полученных сварочной проволокой диаметром 1,2 мм и 2,0 мм с алюминиевым покрытием, объясняется тем, что изломы этих образцов имеют грубую дендритную структуру. Это, по-видимому, можно объяснить повышенным содержанием алюминия в сварном шве. Определили расчетное содержание алюминия в шве при сварке стальных листов толщиной 12 мм электродами с алюминиевым покрытием. Полученные результаты представлены в табл. 2.

С увеличением диаметра сварочной проволоки с алюминиевым покрытием содержание алюминия в ванне сварного шва уменьшается, что, в свою очередь, приводит к получению более мелкозернистой равноосной структуры излома сварного шва. Это способствует увеличению значений ударной вязкости.

Однако необходимо заметить, что, несмотря на достаточно положительные результаты, при сварке электродом диаметром 1,6 мм рельеф излома достаточно плоский, а при сварке электродом диаметром 2,0 мм, хотя структура излома мелкозернистая, рельеф его грубый, с разрывами и большим количеством несплошностей.

На основании вышеизложенного заметим, что содержание алюминия в металле шва существенно влияет на структуру, а следовательно, и на свойства сварного соединения. Стандарт требует, чтобы содержание алюминия в стали составляло не более 0,029%, тогда как обычно его вводят значительно больше для того, чтобы эффективно прошел процесс удаления кислорода из расплава. Однако это справедливо для больших объемов расплава при достаточно продолжительном процессе раскисления. В нашем случае объем расплава в зоне наплавки невелик, незначительна продолжительность его

существования, так как велика скорость охлаждения расплава при формировании сварного шва. Поэтому введенный в результате сварки алюминий не успевает раскислить сварочную ванну, в связи с чем значительная часть его остается в металле сварного шва в виде твердого раствора или интерметаллических соединений. При раскислении стали в металле остается приблизительно 20% вводимого алюминия. При сварке электродом с алюминиевым покрытием в расплаве остается около 80% алюминия. Необходимы дополнительные исследования с целью определения оптимальной толщины алюминиевого покрытия на сварочной проволоке.

Следует отметить, что толщина алюминиевого покрытия оказывает заметное влияние не только на результаты, но и на процесс формирования шва. Качественная оценка процесса сварки проволокой диаметром 1,6 мм с различной толщиной алюминиевого покрытия показала, что увеличение толщины покрытия ухудшает растекание наплавляемого металла. На качество сварки большое влияние оказывает жидкотекучесть наплавляемого металла. Снижение его жидкотекучести при сварке происходит, по-видимому, вследствие образования там частиц продуктов раскисления (оксида алюминия). В связи с этим при сварке электродом с алюминиевым покрытием необходимо создать условия для быстрого всплывания и удаления оксидов и других неметаллических включений. Процесс удаления продуктов раскисления во многом определяет качество будущего сварного соединения. Кроме того, при сварке электродом с алюминиевым покрытием дуга горит более стабильно и практически отсутствует разбрызгивание металла.

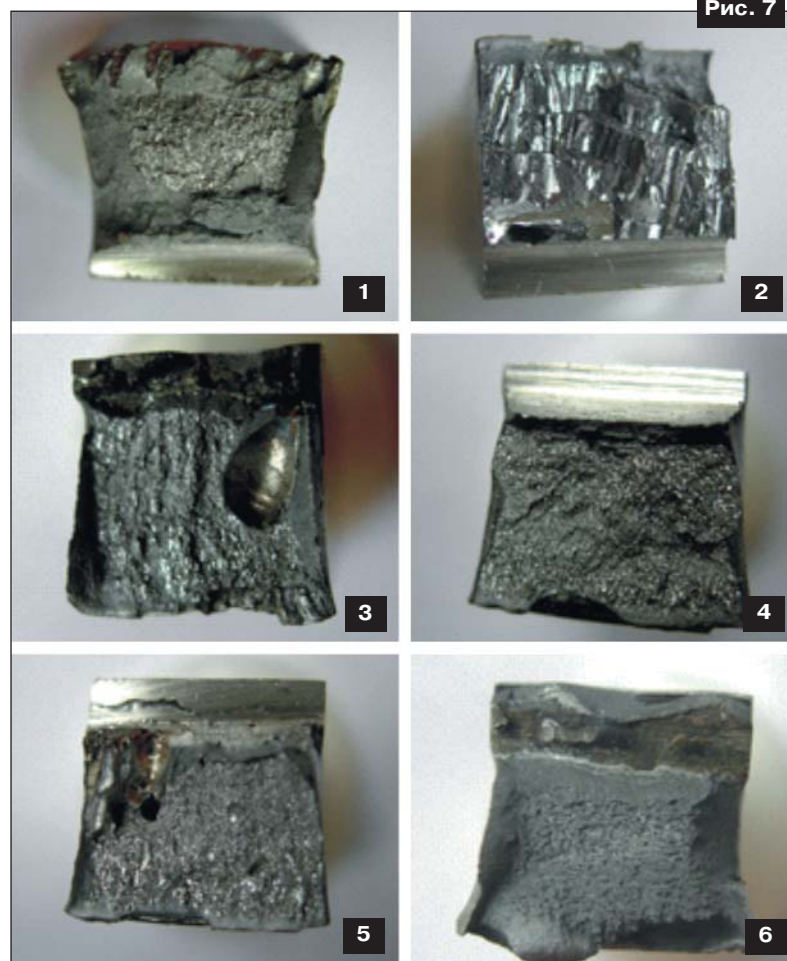


Рис. 7

1,3,5 – сварка электродом без покрытия;
2,4,6 – сварка электродом с алюминиевым покрытием

Таблица 3. Содержание кислорода в сварном шве

Диаметр проволоки, мм	Толщина алюминиевого покрытия, мкм	Защитная атмосфера	Содержание кислорода в сварном шве, %
1,2 без покрытия	–	CO ₂	0,120
1,2 с покрытием	15–20		0,071
1,6 без покрытия	–		0,118
1,6 с покрытием	10–15		0,055
2,0 без покрытия	–		0,120
2,0 с покрытием	15–25		0,08

Микрорентгеноспектральный анализ различных участков исследуемых сварных соединений показал, что в зоне сплавления шва, полученного с помощью электродов диаметром 1,6 мм с алюминиевым покрытием, количество участков, богатых алюминием, значительно меньше, чем после сварки аналогичными электродами диаметром 1,2 мм и 2,0 мм.

В результате сварки алюминированным электродом диаметром 1,6 мм содержание алюминия в зоне сплавления не превышает 0,6%. В то время как аналогичные участки сварного соединения, полученного алюминированными электродами диаметром 1,2 мм и 2,0 мм, достигают 5,0%.

Результаты этих исследований показали, что целью последующих исследований должно быть

определение минимальной толщины алюминиевого покрытия, позволяющего успешно раскислять сварочную ванну.

Это, по-видимому, связано с тем, что некоторое количество алюминия из покрытия на электроде во время сварки взаимодействует с кислородом, содержащимся в наплавляемом металле, в результате чего образуется оксид алюминия. Остальной алюминий переходит в расплав железа, образуя твердые растворы и интерметаллические соединения.

Определяли содержание кислорода в свариваемых образцах и в сварном шве, полученном сваркой электродом без покрытия и с алюминиевым покрытием по методике вакуум-плавления.

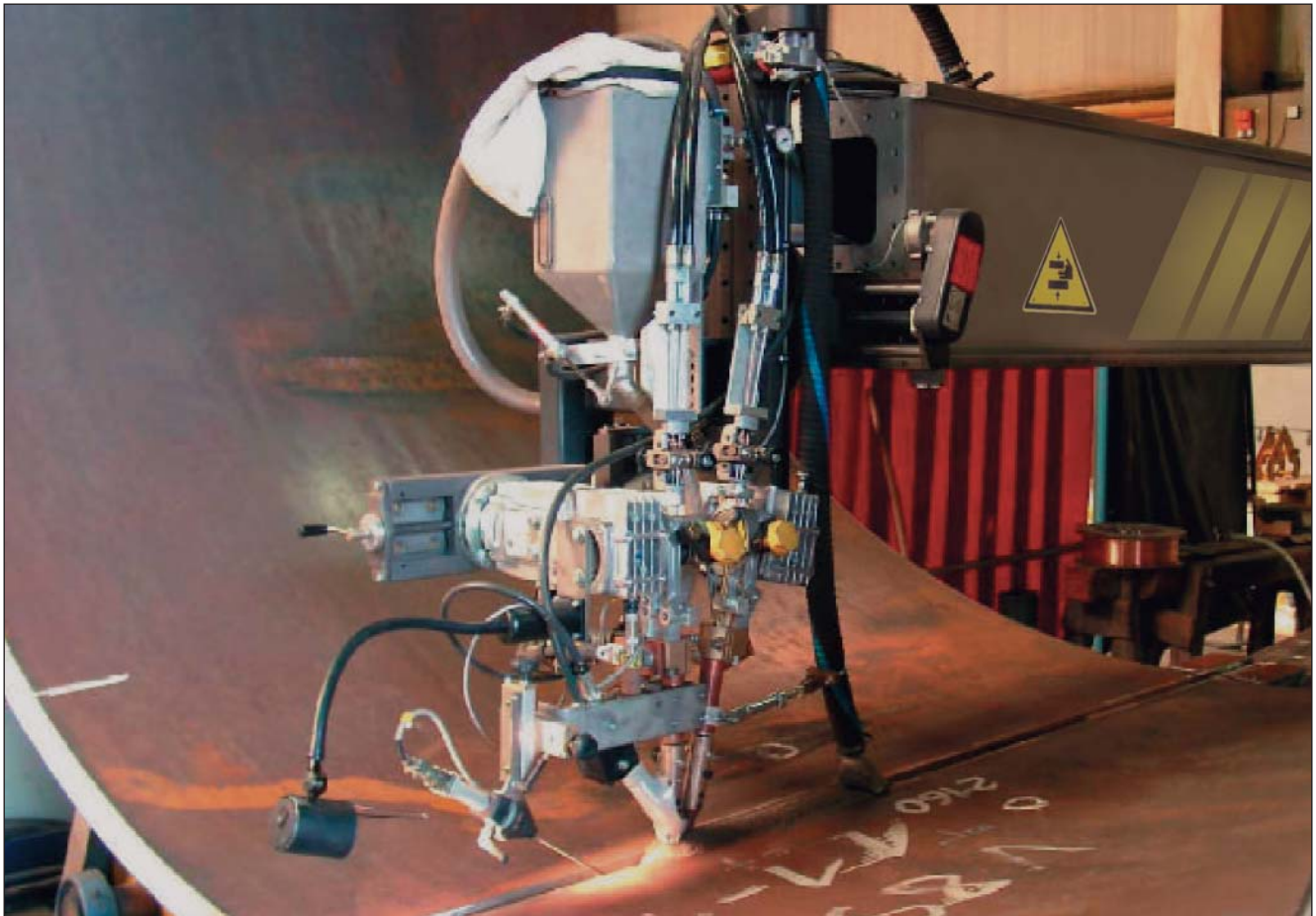
В используемых для сварки образцах содержание кислорода составило 0,017–0,021%.

Результаты определения концентрации кислорода в сварном шве приведены в табл. 3.

Снижение содержания кислорода в шве при сварке электродом с алюминиевым покрытием свидетельствует о том, что алюминий в покрытии действительно связывает свободный кислород в сварочной ванне. Это препятствует образованию газовой пористости в сварном шве и тем самым улучшает его эксплуатационные характеристики.

Таким образом, следует отметить, что если удаление кислорода из сварного шва имеет положительное значение, то неизбежное образование там оксидов, твердых растворов и интерметаллических соединений отрицательно влияет на свойства сварного соединения.

Итак, главным направлением дальнейших исследований в этой области, на наш взгляд, являются работы, направленные на определение оптимальной толщины алюминиевого покрытия на сварочной проволоке и разработка способов и режимов удаления образующихся оксидов алюминия из сварочной ванны.



Выводы

Проведен анализ результатов исследований сварных соединений, полученных сварочной проволокой в исходном состоянии и с алюминиевым покрытием.

1. Результаты проведенных исследований позволяют заключить следующее:

1.1. Алюминиевое покрытие толщиной менее 15 мкм на сварочной проволоке диаметром 1,6 мм улучшает в процессе сварки растекаемость наплавляемого материала, снижает концентрацию свободного растворенного кислорода, облагораживает структуру сварного шва и способствует снижению его пористости;

1.2. Алюминиевое покрытие толщиной до 15 мкм, нанесенное на сварочную проволоку диаметром 1,6 мм, не изменяет прочностных характеристик сварного соединения;

2. При сварке образцов электродами с алюминиевым покрытием на качество сварного соединения оказывают влияние следующие факторы:

2.1. Пластические свойства алюминированной проволоки. Относительное удлинение после нанесения покрытия из расплава алюминия в 4–5 раз больше, чем у исходного материала, и достигает 18,0–18,5%. Недостаточная жесткость проволоки приводит к неравномерному перемещению электрода в сварочном аппарате. В дальнейшем следует определить способ выглаживания поверхности покрытия и повышения механических характеристик алюминированной проволоки;

2.2. Толщина покрытия. Хорошие результаты получены при сварке проволокой диаметром 1,6 мм с покрытием 10–15 мкм. Чем меньше диаметр проволоки, тем меньше должна быть толщина алюминиевого покрытия. В дальнейшем следует определить оптимальные толщины алюминиевых покрытий на стальной проволоке различных диаметров;

2.3. Химический состав алюминиевого покрытия. Полученные в работе результаты позволяют предположить, что содержание железа в покрытии должно быть по возможности высоким (максимальная толщина слоя интерметаллидов). В дальнейшем следует определить возможность легирования сварного шва химическими элементами из покрытия;

2.4. Параметры сварки. Режимы сварки специально не подбирались, а были такими же, как и для сварки проволокой без покрытия. В дальнейшем следует определить оптимальные режимы сварки стальной проволокой с алюминиевым покрытием;

2.5. Защитный газ. В данной работе при сварке применялся газ CO₂. Была опробована сварка алюминированным электродом в среде аргона. Качественная оценка свидетельствует о том, что наплавка осуществляется равномерно с хорошим растеканием расплава независимо от толщины алюминиевого покрытия на электроде;

3. Для определения оптимальных параметров алюминиевого покрытия, способствующих повышению эксплуатационных характеристик сварного соединения, следует провести следующие работы:

3.1. Определение оптимальной толщины и химического состава алюминиевого покрытия на сварочной проволоке различного диаметра;

3.2. Определение оптимальных режимов сварки электродами с алюминиевым покрытием;

3.3. Определение дисперсности и формы включений оксида алюминия в сварном шве в зависимости от толщины покрытия и режимов сварки;

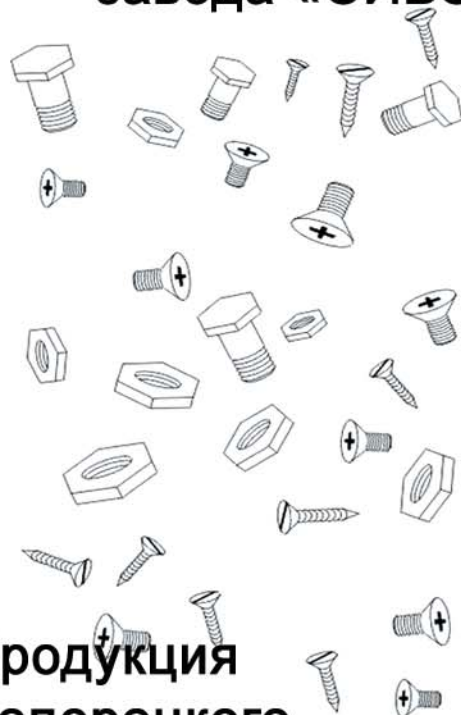
3.4. Определение режима волочения стальной проволоки с алюминиевым покрытием.

ООО "МЕТИЗ СЕРВИС"

г. Магнитогорск

проволока, проволока ВР1,
сетка, электроды,
болты, винты,
гайки, гвозди, шурупы.

Электроды
Тюменского
завода «СИБЭС»



Продукция
Белорецкого
металлургического
комбината

ОТГРУЗКА СО СКЛАДА
КОМПЛЕКТАЦИЯ
СБОРНЫХ ЗАКАЗОВ
ОПЕРАТИВНОСТЬ

Тел./факс
(3519) 34-53-76,
34-74-19,
34-47-14,
30-71-55