



Появление на российском рынке широкого ассортимента зарубежных высококачественных марок коррозионностойких сталей расширило области применения и возможности взаимозаменяемости марок различного типа. Однако наиболее экономически эффективная замена традиционно используемых аустенитных хромоникелевых нержавеющей сталей на новые, более дешевые хромистые или более качественные хромоникелевые, часто создает для отечественного производителя технологические проблемы, связанные с прочностью и коррозионной стойкостью сварных соединений конструкций

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЫБОРА ПРИСАДОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

Появление на российском рынке широкого ассортимента зарубежных высококачественных марок коррозионностойких сталей расширило области применения и возможности взаимозаменяемости марок различного типа. Однако наиболее экономически эффективная замена традиционно используемых аустенитных хромоникелевых нержавеющей сталей на новые, более дешевые хромистые или более качественные хромоникелевые, часто создает для отечественного производителя технологические проблемы, связанные с прочностью и коррозионной стойкостью сварных соединений конструкций. В особенности это касается сварки высоколегированных хромистых сталей серии AISI 400. Неадекватный выбор сварочного присадочного материала (ПМ), способа или режима дуговой сварки часто приводит производителя к ложным выводам о невозможности применения новых нержавеющей сталей в конкретных условиях того или иного производства или о плохом качестве поставленного металла.

Химический состав готового сварного шва либо должен быть идентичен составу свариваемой стали, либо может отличаться от него так, чтобы обеспечивать приемлемые коррозионные и механические свойства. Структуры шва и зоны термического влияния (ЗТВ) должны обеспечивать их максимально высокие прочностные характеристики. В зависимости от конкретных условий эксплуатации шов должен быть чисто аустенитным, ферритным или аустенитно-ферритным.

В общем случае для сварки одинаковых сталей возможно использование ПМ, у которых химический состав отличается от состава свариваемого металла. А именно:

■ Аустенитные Ni-Cr ПМ могут быть использованы как для сварки ферритных хромистых сталей, так и для сварки нержавеющей сталей с углеродистыми, за исключением используемых в восстановительной серосодержащей атмосфере.

■ Нестабилизированные электроды или проволоки со сверхнизким содержанием углерода ($\leq 0,035$) могут быть использованы для сварки стабилизированных металлов.

■ ПМ, содержащий молибден, может быть использован для сварки сталей, не содержащих молибден, за исключением тех случаев, когда сварная конструкция эксплуатируется в сильно окислительной атмосфере (например, в азотной кислоте).

Для получения однородного химического состава сварной конструкции содержание основных металлических легирующих элементов (хром и никель) в ПМ должно быть, в общем случае, несколько выше, чем в свариваемой стали. Это объясняется тем, что локальное обеднение легирующими примесями может происходить вследствие зональной ликвации легирующих элементов в зоне переплава. Кроме того, даже при использовании защитной атмосферы происходит частичное выгорание таких элементов, как, например, хром и титан, имеющих высокое сродство к кислороду и высокое давление насыщенного пара. Стандарт DIN EN 439 регламентирует, к какой группе относится за-

щитный газ, в зависимости от содержания в нем остаточного кислорода и углекислого газа. Отсюда делается вывод о степени выгорания основных легирующих элементов как из свариваемого материала, так и из ПМ. Например, стабилизируемый ниобием электрод марки G19-9-NbSi (19Cr/9Ni) при использовании защитного газа, относящегося к группе M23 (5% CO₂ + 4% O₂), теряет ~0,35% хрома, 0,28% марганца и 0,14% кремния. Поскольку отечественные газовые смеси часто не обеспечивают столь высокую степень защиты от окисления, потери легирующих компонентов могут достигать нескольких процентов. Поэтому для сварки аустенитной никельсодержащей стали марки 304 (19Cr/9Ni) желательно использовать электрод или проволоку, содержание основных легирующих компонентов в которых соответствует стали 308L (20Cr/11Ni).

При сварке таких популярных экономолегированных хромом марок сталей как AISI 409 или 08X13 даже малая поте-





ря хрома может привести к резкому снижению, более того — изменению знака электрохимического потенциала поверхности и, соответственно, к потере коррозионной стойкости шва. При режимах сварки, приводящих к локальному перегреву и кипению ванны расплава сварного шва (длинная дуга), степень выгорания легирующих примесей может существенно возрасти. Поэтому для сварки ферритных сталей типа 409 (11% Cr) во избежание критического обеднения хромом сварного шва лучше использовать электроды или присадочные проволоки из стали 410 (12% Cr) или 430 (17% Cr).

При сварке же высоколегированных хромистых сталей типа 430 (16–18% Cr) с низким содержанием углерода (реально $\leq 0,04$) допустимо использовать присадочный материал аналогичного химического состава. Например, листовую сталь 430 можно сваривать аргоно-дуговой сваркой, используя в качестве присадочного материала проволоку аналогичного химического состава. Известно, что в отличие от отечественных марок, низкое содержание углерода в зарубежных нержавеющих сталях гораздо более надежно обеспечивает защиту сварных соединений от межкристаллитной коррозии (МКК), в результате которой при сварке происходит зернограничное обеднение хромом вследствие образования цепочек карбидов $Cr_{23}C_6$ с последующим коррозионным разрушением шва. Поэтому содержание углерода в ПМ должно быть гораздо меньше, чем в свариваемой стали. Нежелательно, например, использовать отечественную проволоку 12X18H10T (0,12% C) в качестве расходного материала для полуавтоматической дуговой сварки низкоуглеродистых зарубежных нержавеющих сталей любого типа, поскольку стабилизирующий структуру титан выгорит в первую очередь, создавая предпосылки для развития МКК. Вследствие высокого сродства к кислороду, титан не может эффективно использоваться в качестве ста-

билизатора углерода в ПМ. Поэтому импортные стабилизированные электроды и проволоки легированы только ниобием. Стандарты DIN EN 12072 и 1600 регламентируют, что для сварочных электродов и сварочных проволок массовая доля ниобия должна быть в 8–12 раз больше массовой доли углерода. Однако, как было упомянуто выше, данное правило не относится к наиболее распространенным ПМ со сверхнизким содержанием углерода ($\leq 0,035\%$), обеспечивающим полную устойчивость сварного шва к межкристаллитной коррозии (МКК). В общем случае содержание углерода в материале присадки должно быть меньше, чем в материале свариваемой матрицы.

Понижение скорости кристаллизации сварного шва вследствие неправильно выбранного режима сварки или использования расходного материала слишком большого диаметра инициирует развитие МКК. Склонность сварных соединений к МКК можно устранить их последующей термообработкой (закалка с охлаждением), которая растворит карбиды и переведет их обратно в твердый раствор, выравнявая концентрацию хрома в зернах феррита или аустенита. Кроме того, последующий отжиг гомогенизирует химический состав металла сварного шва, который находится в литом состоянии, поэтому подержен сегрегации и, следовательно, питтинговой коррозии. Например, для сварки ферритных хромистых сталей послесварочный отжиг при 760 °C является универсальным средством снятия напряжений и предотвращения возможной МКК. Однако на практике технологически сложно проводить подобную термообработку и поэтому следует оптимизировать технологию сварки путем максимального возможного снижения удельного энерговклада и применения расходных материалов минимального диаметра. Что касается сварки импортных сталей, то низкое содержание углерода (реально менее 0,04%) является весомой гарантией предотвращения МКК.

Недостатком сварных соединений ферритных и мартенситных хромистых нержавеющих сталей серии AISI 400 является их относительно невысокая пластичность (склонность к холодному трещинообразованию), обусловленная интенсивным ростом зерна как в самом шве, так и в ЗТВ при температурах выше ~900 °C. Для предотвращения быстрого охлаждения, приводящего к растрескиванию, сварку следует производить в условиях предварительного подогрева до 150–250 °C. Однако можно избежать и этой дополнительной технологической операции. Для повышения пластичности и прочности

сварного шва ферритные хромистые стали нужно сваривать, используя в качестве наплавочного материала аустенитные никельсодержащие проволоки или электроды тонкого диаметра. Так, для сварки сталей 403, 405, 409, 410, 414, 420, 430, 431 и др. в качестве ПМ желательно использовать аустенитную сталь 309 (23Cr/13,5Ni). Единственным ограничением является то, что сварное соединение в этом случае будет неустойчиво к коррозии в серосодержащих средах.

При сварке двух аустенитных никельсодержащих нержавеющих сталей, различающихся только количественно по химическому составу, следует подбирать ПМ к менее легированной стали. Например, для сварки разных сталей марок 310 (25% Cr, 20% Ni) и 304 (19% Cr, 10% Ni) применяют ПМ на основе стали 308L (20% Cr, 11% Ni). Если же свариваемые стали принципиально различаются по химическому составу (классу) и по назначению, то материал электрода или проволоки должен обеспечивать получение прочного, стойкого к растрескиванию сварного шва. Поэтому сварка аустенитной стали 308 и ферритной стали 430 может быть проведена при помощи наплавочного материала 309.

Вообще полностью аустенитный сварной шов обладает крупнозернистой структурой и имеет склонность к горячему растрескиванию. Это нежелательное явление может быть ограничено, если металл сварного шва содержит некоторое количество феррита (δ -феррит), который, первично кристаллизуясь, препятствует быстрому росту зерна аустенитной матрицы, повышая прочностные свойства шва и этим предотвращая растрескивание. Содержание феррита в металле сварного шва регулируется содержанием легирующих элементов ПМ: никель, углерод, марганец и азот способствуют образованию аустенита; хром, кремний, молибден и ниобий — феррита. Прецизионно подобранный баланс этих легирующих элементов в ПМ обеспечивает нужную величину ферритной составляющей в сварном шве (ферритный номер), являясь обязательной характеристикой любого импортного электрода или проволоки, которая прописывается в сертификате качества.

Для того чтобы получить пластичный шов, необходимо подобрать ПМ таким образом, чтобы содержание хрома и никеля в нем составляло не менее 17 и 7% соответственно, обеспечивая наличие некоторого количества δ -феррита. Например, содержание δ -феррита лимитируется нормами химической и нефтехимической промышленности в пределах

2–12% и экспериментально определяется в соответствии со стандартом ISO 8249:2000 «Определение ферритного числа (ferritic number – FN) в сварных соединениях нержавеющей сталей». Значение ферритного числа совпадает с объемной процентной долей феррита при содержании феррита 0–7%; при большем ее содержании, FN возрастает значительно быстрее. Однако содержание феррита не должно быть высоким, так как при низких температурах феррит теряет прочность, а при высоких (выше ~550 °С) становится хрупким. При его большом содержании снижаются коррозионная стойкость, пластичность и ударная вязкость сварного шва, в том числе и вследствие образования сигма-фазы на ферритной решетке по границе аустенитных зерен при высоких рабочих температурах эксплуатации сварной конструкции или при термообработке после сварки.

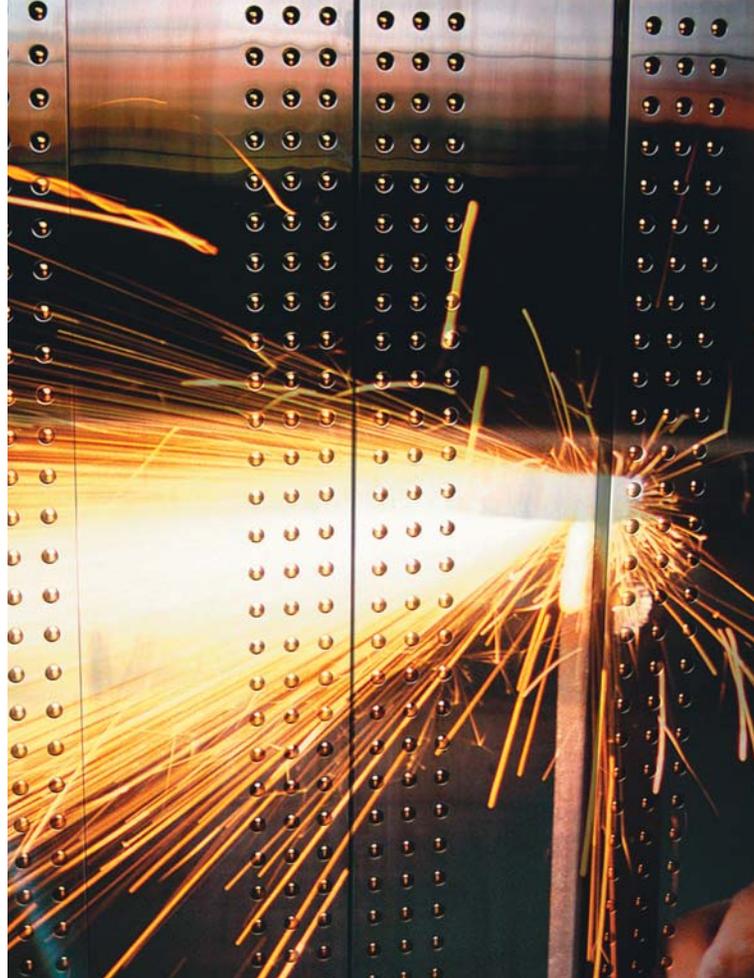
Не содержащий феррита сварной шов представляет интерес для производителей сварных сосудов для транспортировки жидких газов или сосудов, работающих под давлением, так как ударная вязкость аустенита при низких температурах будет повышенной. Полностью аустенитный шов ($FN \leq 0,5$) требуется также в тех случаях, когда необходима очень высокая коррозионная стойкость в сильно агрессивных восстановительных и окислительных средах.

Конечно, не только фазовый состав сварного аустенитного шва определяет его трещиностойкость. Вероятность растрескивания повышается с увеличением объема расплавленного при сварке металла. Большой объем расплава, полностью состоящего из аустенита, застывает медленно с образованием крупнозернистой структуры и малой эффективной поверхностью границ зерен. С другой стороны, малый объем расплавленного металла застывает быстро, образуя трещиностойкую мелкозернистую структуру. Поэтому аустенитные ПМ должны использоваться при минимальной мощности сварки. Вообще, сварка любых нержавеющей сталей, независимо от типа используемого ПМ, должна проводиться при использовании минимального диаметра электродов (проволоки) и при минимально возможном токе, обеспечивающем полную провариваемость стыка. Так, мощность энергоклада и/или скорость сварки влияют на степень перемешивания ПМ с основным металлом и, следовательно, на содержание феррита в сварном шве. Иногда при нанесении первого слоя скорость сварки выбирают минимальной, что обеспечивает малое перемешивание с основным металлом и

исключает появление недопустимо высокого содержания феррита.

Когда изготовитель использует стандартные материалы, которые, как правило, содержат меньше вредных включений, чем свариваемый металл, то риск горячего растрескивания меньше, если в расплав переходит больше присадочного металла. В стандартных аустенитных сварочных расходных материалах типа 308L, 316L, 347 и 317L горячее трещинообразование исключается их химическим составом. Содержание феррита в присадке на уровне ~10% ($FN=10$) на практике обычно достаточно, если только отсутствует избыточный массоперенос феррита в шов из свариваемых металлов. (Последнее в большей степени относится к сварке нержавеющей стали с углеродистой сталью.) Следует отметить, что послесварочная обработка подобных аустенитных швов с ферритной составляющей не требуется. В общем случае для сварки аустенитных сталей не нужен предварительный нагрев и послесварочная термообработка. Их низкая теплопроводность (30–40% теплопроводности нелегированных сталей) и относительно низкие температуры плавления обуславливают возможность их сваривания с меньшими затратами тепла. Во избежание перегрева или прожигания в случае более тонких свариваемых деталей следует использовать повышенные скорости сварки. Для стабилизации структуры иногда под свариваемую аустенитную сталь подкладывают медные бруски, ускоряющие теплоотвод.

Вообще, ферритное число можно не только определить экспериментально, но и рассчитать по химическому составу металла шва. Существует простая, но достаточно эффективная методика расчета химического состава шва. Результаты экспериментальных исследований поперечных шлифов различных сварных соединений показали, что конвективный массоперенос (перемешивание жидкого металла до момента кристаллизации) по ванне расплава шва приводит к тому, что его химический состав на 60–80% состоит из материала электрода или проволоки и на 20–40% из свариваемых материалов (соответственно по 10–20% с каждой стороны). Условно говоря, происхо-



дит «разбавление» материала ПМ свариваемой сталью. Конечно, процентное содержание легирующих варьируется в зависимости от скорости сварки, толщины свариваемых сталей, типа сварного соединения (например, по ГОСТу 5264), величины энергоклада и т.п. Приблизительно оценив химический состав сварного шва и используя известную диаграмму Шеффлера, можно определить тип его микроструктуры.

Для эффективной сварки углеродистой стали с нержавеющей предпочтительно обеспечить содержание хрома и никеля в металле сварного шва на уровне ~18 и 8% соответственно. В этом случае металл сварного шва будет с большей вероятностью аустенитным с некоторой долей феррита, что обеспечит требуемую прочность и стойкость к растрескиванию. При сварке углеродистой стали с относительно экономнолегированной сталью 304 такое «разбавление», например, сварочной нержавеющей проволоки того же состава (304) неизбежно приведет к формированию хрупкого мартенситного шва. Если же выбрать ПМ на основе стали 314, который содержит большое количество хрома и никеля (26 и 22% соответственно), то получится полностью аустенитный шов, что также нежелательно. Применение же, например, проволоки 309 обеспечивает оптимальную аустенитную структуру шва с ферритной составляющей. Похожие рассуждения применимы и к сварке однородных и разнородных соединений хромистых сталей типа 409, 430, 439 и др., для сварки которых также оптимально использовать присадку на основе материала 309.

Свариваемый металл	409	410	430	439	304
409	309 308 Св-07Х25Н13 Св-07Х19Н10Б 430 439	309 Св-07Х25Н13 Св-07Х19Н10Б 430 439	309 Св-07Х25Н13 Св-07Х19Н10Б 430 439	309 Св-07Х25Н13 Св-07Х19Н10Б 430 439	309 Св-07Х25Н13 Св-07Х19Н10Б 430 439
410		309 Св-07Х25Н13 Св-07Х19Н10Б 430 439	309 Св-07Х25Н13 Св-07Х19Н10Б 430 439	309 Св-07Х25Н13 Св-07Х19Н10Б 430 439	309 Св-07Х25Н13 Св-07Х19Н10Б 430 439
430			309 Св-07Х25Н13 Св-07Х19Н10Б	309 Св-07Х25Н13 Св-07Х19Н10Б	309 Св-07Х25Н13 Св-07Х19Н10Б
439				309 Св-07Х25Н13 Св-07Х19Н10Б 439 430	309 Св-07Х25Н13 Св-07Х19Н10Б
304					308 316 Св-04Х19Н11М3

*Аустенитный шов с ферритной составляющей.
Ферритный материал сварного шва.*

Таблица иллюстрирует выбор присадочных проволок для сварки некоторых популярных импортных сталей. На пересечении строк и столбцов приведены некоторые марки присадочной проволоки по классификации AISI (США) и по ГОСТу 2246–70, которые могут быть использованы при сварке данных сталей. Эти сварочные материалы могут обеспечить получение различных по фазовому составу сварных швов. Конечно, данная таблица не является исчерпывающей, и кроме приведенных в таблице марок присадочных проволок существуют марки со специальными свойствами (низкое содержание феррита, высокое содержание углерода, сверхнизкое содержание примесей и углерода и т.д.). Желательно предварительные тесты на качество сварного соединения.

Если в общем случае желательно, чтобы содержание основных легирующих элементов – Сг и Ni – было выше в ПМ, чем в свариваемой матрице, то уровень примесей (сера, фосфор и др.) в проволоке должен быть минимален. Нежелательные примеси отрицательно влияют на стабильность дуги, растекаемость и смачиваемость металла сварного шва. Поскольку примеси располагаются по границам зерен, то увеличение размера зерна в процессе сварки (в особенности это касается ферритных хромистых сталей) сопровождается повышением локальной межзеренной концентрации примесей, повышением риска образования горячих трещин и, как следствие, снижением прочности шва. Влияние вредных примесей можно также снизить при использовании сварочных расходных материалов, разумно легированных марганцем, который, связывая серу, препятствует образованию чрезвычайно вредных сульфидов железа.

Особое внимание следует уделить выбору ПМ, если свариваемый металл легирован молибденом, который обладает сильно ограниченной растворимостью в железе как в жидком, так и в твердом состоянии. Ранее уже было сказано, что ме-

талл сварного шва находится в литом состоянии и подвержен сегрегации, которая возрастает с увеличением содержания молибдена. Сегрегация и разделение фаз приводят к появлению слабых мест, что ведет к возникновению питтинговой и щелевой коррозии сварного шва. При содержании Мо до 4% возможно использование ПМ с тем же набором легирующих, что и у свариваемого металла. Но если в свариваемом металле свыше 4% Мо, то сварочный электрод или проволока на никелевой основе должны содержать большее количество молибдена (до 9%). В этом случае для гомогенизации состава металла сварного шва необходим его последующий отжиг.

Наличие кремния в ПМ не только гарантирует хорошую жидкотекучесть и смачиваемость, но и обеспечивает стабильность горения дуги. ПМ с высоким содержанием кремния не следует применять для сварки аустенитных сталей (без ферритной фазы), поскольку с повышением содержания кремния повышается риск их горячего растрескивания. Однако для аустенитного металла сварного шва, где содержание феррита соответствует FN=5 или более, наличие до 2% кремния не оказывает заметного влияния на устойчивость к горячему растрескиванию.

В заключение отметим, что даже правильный выбор присадочного материала не гарантирует хорошего качества сварного соединения. Особого внимания требует подготовка ПМ и свариваемых поверхностей к сварке, а также проведение необходимых механических операций после сварки. Резка и зачистка свариваемых кромок должна производиться так, чтобы избежать перегрева и исключить попадание примесей, негативно влияющих на качество сварного шва. Например, если использовались карбидсодержащие диски или плазменная резка посредством угольной дуги, то должна быть проведена соответствующая шлифовка свариваемых кромок, исключающая попадание избы-

точного углерода в сварное соединение. Желательно использовать такие способы раскроя, как гильотина, резка с использованием специально предназначенных дисков на основе абразивов SiO₂ или Al₂O₃, плазменная бескислородная азотная резка и др. Маркирование цветными карандашами или термочувствительными мелками, содержащими масло, в сварочной области запрещено.

Свариваемые кромки должны быть зачищены с использованием специальных абразивных материалов, обезжирены, желательно протравлены 10-процентным раствором азотной кислоты, промыты и высушены до сварки и, возможно, в ее процессе, если сварной шов многопроходный. После сварки также необходимо провести механическую зачистку, шлифовку, травление (пассивацию) и промывку. Механическая обработка сварного шва не только устраняет неоднородности рельефа, но и удаляет концентраторы напряжений в виде микротрещин, которые могут не только развиваться при воздействии нагрузки, но и служить локальными очагами зарождения ножевой коррозии. Для предотвращения контактной коррозии могут быть использованы только приспособления из коррозионностойких материалов (проволочные нержавеющие щетки, молотки для отбивания окалины и зажимные устройства). В местах нарушения пассивного покрытия впоследствии может развиваться коррозия, поэтому для достижения наилучшей коррозионной стойкости всегда необходимо удалять следы коррозии, сварочные брызги, цвета побежалости или другие продукты окисления со сварных швов и ЗТВ. Обработка может быть произведена посредством очищения, шлифования, травления или пескоструйного обдува кварцевым песком и т.п. Предварительно очищенные участки сварного шва протравливаются посредством погружения, опрыскивания или использования паст для травления, а после травления следует произвести тщательное промывание водой. ■