

УДК 621.791.75.042

## ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ МАРТЕНСИТНЫХ ХРОМИСТЫХ И АУСТЕНИТНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ

Л. С. ЗАХАРОВ, А. Р. ГАВРИК, В. Н. ЛИПОДАЕВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведены исследования по разработке низкоуглеродистых хромистых электродов типа 05X6МФ. Изучено влияние состава покрытия на содержание углерода в наплавленном металле типа Х6М. Установлено, что наиболее эффективным для его снижения является совместное введение оксидов хрома и циркония в количестве 5...10 мас. % при одновременном исключении из покрытия мрамора. Создана шлаковая система покрытия фторидно-магнийоксидного вида, обеспечивающая снижение содержания углерода в наплавленном металле до 0,04...0,06 мас. % при достаточно низком содержании диффузионного водорода. На ее базе разработаны электроды марки АНЛ-10, предназначенные для сварки разнородных соединений мартенситных хромистых сталей типа 10X9НМФБ и аустенитных хромоникелевых сталей типа 10X18Н10Т. Электроды обеспечивают стабильное горение дуги, незначительное разбрызгивание, хорошее формирование во всех пространственных положениях и легкую отделимость шлаковой корки. Библиогр. 12, табл. 3, рис. 2.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, разнородные стали, покрытые электроды, наплавленный металл, снижение углерода, диффузионный водород, сварочно-технологические свойства

В современных энергоблоках со сверхкритическими параметрами пара (рабочая температура 600 °С) для изготовления высокотемпературных компонентов используются мартенситные стали типа 10X9НМФБ. Благодаря сложной системе легирования и высокому содержанию хрома они имеют более высокую длительную прочность и большую коррозионную стойкость, чем традиционные низколегированные перлитные и бейнитные стали [1]. При строительстве новых энергетических блоков, а также ремонте старых трубных систем такие стали входят в соединения с трубными системами с температурой эксплуатации больше 610 °С, изготовленными из аустенитных сталей типа 10X18Н10Т.

Как известно при сварке разнородных соединений, работающих при температуре свыше 500 °С, обычно применяются присадочные материалы, которые обеспечивают высоконикелевый аустенитный наплавленный металл. Однако наши исследования показали, что при сварке мартенситной стали 10X9НМФБ (P91) с аустенитной сталью 10X18Н10Т в зоне термического влияния стали P91 наблюдается образование цепочки зерен структурно-свободного феррита даже при содержании никеля в металле шва свыше 50 мас. % (рис. 1, а). Это может вызвать значительное снижение работоспособности сварных конструкций [2]. В связи с этим возникла необходимость изменения технологии сварки таких соединений.

Проведенные исследования показали, что для предотвращения образования прослойки феррита

и обеспечения требуемых прочностных характеристик зоны сплавления необходимо предварительно облицевать кромку стали 10X9НМФБ специальным присадочным материалом (рис. 1, б), содержащим 5...7 мас. % Cr и 0,8...1,0 мас. % Mo. Содержание углерода в наплавленном металле должно находиться в пределах 0,04...0,06 мас. %. В этом случае для заполнения основного сечения шва могут

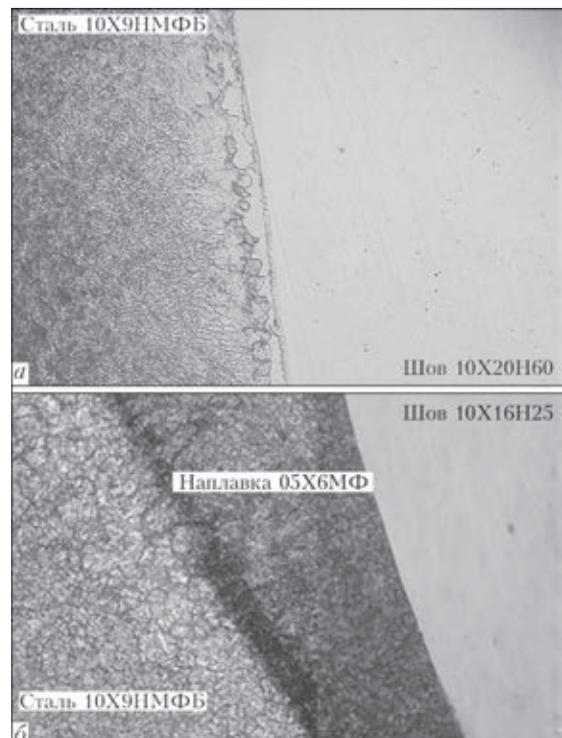


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 300$ ) зоны сплавления стали 10X9НМФБ с аустенитным швом

© Л. С. Захаров, А. Р. Гаврик, В. Н. Липодаев, 2014

Таблица 1. Химический состав наплавленного металла, мас. %

Марка электрода	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P
ЦЛ-32	0,12...0,16	<0,50	0,3...0,7	10...12	0,8...1,1	0,9...1,25	<0,03	<0,035
ЦЛ-41	<0,10	<0,75	0,2...0,6	11...14	1,0...1,5	-	<0,03	<0,035
ЦЛ-51	<0,04	<0,35	0,15...0,6	12...15	1,8...2,5	-	<0,025	<0,03
ЦЛ-57	0,06...0,14	<0,60	0,3...0,8	8,5...10,5	-	0,9...1,2	<0,025	<0,03

применяться материалы типа 10X16H25. Поскольку электроды, обеспечивающие такое легирование и пониженное содержание углерода в наплавленном металле ранее не применялись, нами были проведены исследования по их разработке.

Обычно для сварки сталей с содержанием 8...12 мас. % Cr, применяют электроды двух видов: карбонатно-флюоритного (ЦЛ-32, ЦЛ-41) и рутил-флюоритно-карбонатного (ЦЛ-51, ЦЛ-57). При этом соотношение флюорита к мрамору меняется в очень больших границах (от 3,5:5 до 5,5:3,5). Как видно из табл. 1, пониженное содержание углерода в наплавленном металле обеспечивают только электроды ЦЛ-51, для изготовления которых применяется низкоуглеродистая проволока марки Св-01Х12Н2-ВИ с содержанием 12...15 мас. % Cr и 2...3 % Ni. Такая проволока не может обеспечить необходимое содержание легирующих элементов, поэтому проведены исследования по разработке низкоуглеродистых хромистых электродов типа 05Х6МФ на базе проволоки марки Св-08А с легированием через покрытие. Поскольку содержание углерода в ней может достигать 0,10 мас. %, необходимо было выбрать состав покрытия, обеспечивающий его снижение до 0,04...0,06 мас. %.

Выгорание углерода при сварке зависит от многих факторов: способа и режима сварки, состава и количества защитной среды, исходного содержания углерода в присадочном материале и пр. [3–7].

При ручной сварке покрытыми электродами на переход углерода в наплавленный металл влияет как состав покрытия и его толщина (коэффициент массы покрытия), так и режимы сварки. Наибольшее выгорание углерода наблюдается при сварке электродами с покрытием на основе кварца и гематита, а наименьшее — при использовании плазменного шпата [3].

При ручной сварке электродами со фтористо-кальциевым покрытием повышение содержания углерода в металле шва происходит преимущественно за счет оксида углерода, который образуется в результате разложения мрамора, а

также углерода ферросплавов, которые вводятся в покрытие. В связи с этим в покрытии электродов для сварки низкоуглеродистых высоколегированных сталей снижают до минимума количество мрамора или полностью его исключают [6].

Восстановление углерода из покрытия происходит за счет элементов-раскислителей, которые содержатся в нем или в электродном стержне. Так, при нагреве ферромарганца в смеси с мрамором до 600...900 °С наблюдается повышение содержания углерода в результате взаимодействия с углекислым газом, который образуется при диссоциации CaCO<sub>3</sub>. После нагрева в печи образцов у покрытий из смесей мрамора с металлическим хромом наблюдалось увеличение содержания углерода в хrome с 0,08 до 0,7...1,5 мас. % [3].

Следует отметить, что переход углерода в наплавленный металл зависит не только от состава покрытия, но и от содержания углерода в металле электродного стержня. При высоком содержании углерода в проволоке (Св-18ГСА) наблюдается его выгорание при увеличении соотношения мрамор/флюорит, что объясняется повышением окислительного потенциала покрытия. В то же время при низком содержании углерода в проволоке (Св-06Х19Н9Т), наоборот, его содержание повышается в наплавленном металле [5].

Уменьшая количество мрамора и вводя в покрытие электродов оксиды железа (гематит, магнетит или железную окалину), можно не только предотвратить повышение содержания углерода в наплавленном металле, но и немного его снизить [7]. При сварке электродами с рутил-фтористо-кальциевым покрытием, которое содержит до 10 мас. % мрамора, эффективнее использовать термически более стойкие оксиды Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ZrO<sub>2</sub> [8]. Это объясняется тем, что они имеют температуру плавления свыше 2000 °С и реагируют с углеродом при более высокой температуре, при которой он является наиболее активным раскислителем. Кроме того, возможно окисление углерода на стадии капли, поскольку по данным [9], диссоциация Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> начинается при температуре ниже температуры его

Таблица 2. Содержание компонентов в сухой шихте, мас. %

Компонент шихты	Номер варианта								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Мрамор	53	10	10	0	0	0	0	0	0
Флюорит	10	10	10	10	10	10	10	15	20
Обоженный магнезит	0	30	30	30	30	30	30	30	30
Оксид хрома	-	-	-	2	5	8	12	12	12
Циркониевый концентрат	-	-	-	-	-	-	-	5	10
Ферротитан	15	15	10	10	10	10	10	10	10

Примечание. В состав покрытия всех вариантов электродов вводили хром, молибден, ферросилиций, марганец.

плавления. Кроме того, оксиды хрома при температуре плавления (~2400 °С) летучи [8, 10] и таким образом возможно их наличие в газовой фазе дугового промежутка.

Согласно работе [7], чем выше температура плавления оксида и чем меньше химическое сродство металла данного оксида к кислороду, характеризующееся термодинамическим потенциалом образования оксида  $\Delta Z^0$ , тем интенсивнее окисляются углерод, марганец или хром. Благодаря большому химическому сродству циркония к кислороду в сравнении с хромом оксид первого окислит элементы значительно меньше, чем оксид второго. Оксиды железа и никеля с температурой плавления ниже 2000 °С незначительно окисляют углерод и довольно интенсивно — марганец и особенно кремний.

При разработке низкоуглеродистых хромистых электродов преимущество в использовании, вероятно, следует отдать оксиду хрома, поскольку в этом случае одновременно с выгоранием углерода происходит восстановление хрома.

Кроме влияния шлаковой системы покрытия, дополнительным средством ограничения количества углерода в металле шва может быть и подготовка сырьевых материалов, а именно высокотемпературная прокатка минеральных шлакообразующих компонентов шихты. Выдержка флюоритового концентрата, рутила, гематита и пр. при температуре 800 °С на протяжении 2 ч позволяет уменьшить содержание углерода в наплавленном металле на 0,01...0,03 мас. % [11].

На переход углерода в наплавленный металл значительно влияют и режимы сварки. Так, при сварке электродами УОНИ-13/55 повышение напряжения (длины дуги) вызывает уменьшение содержания углерода почти в два раза, что объясняется повышением срока существования капли и более полным протеканием реакций, в то же время изменение сварочного тока практически не влияет на этот процесс [12].

Проведенный анализ литературных данных позволяет определить такие основные направления проведения экспериментов по разработке низкоуглеродистых высокохромистых электродов, как уменьшение содержания или полное исключение карбонатов из состава покрытия, дополнительное введение активных оксидов, повышение коэффициента массы покрытия электродов, предварительную прокатку компонентов шихты.

Для выбора оптимального состава покрытия изготовлены опытные партии электродов. Исследовано влияние вида покрытия на переход легирующих компонентов, содержание газов в наплавленном металле и сварочно-технологические свойства электродов.

В первой серии экспериментов в покрытия электродов типа УОНИ-13/45 вместо мрамора вводили обоженный (металлургический) магнезит. Экспериментально установлено, что уменьшение углерода в наплавленном металле наблюдается только при одновременном снижении содержания ферротитана в покрытии. В противном случае даже наблюдается восстановление углерода (табл. 3).

Таблица 3. Химический состав наплавленного металла, мас. %

Номер варианта по табл. 2	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1	0,079	0,27	0,37	5,1	0,71	0,24
2	0,091	0,57	0,53	5,8	0,77	0,31
3	0,067	0,63	0,38	6,6	0,75	0,38
4	0,075	0,37	0,51	7,2	0,84	0,35
5	0,063	0,30	0,49	7,8	0,76	0,22
6	0,052	0,41	0,38	8,2	0,72	0,25
7	0,055	0,32	0,42	7,3	0,77	0,28
8	0,044	0,22	0,37	6,3	0,81	0,21
9	0,045	0,20	0,28	6,0	0,84	0,22

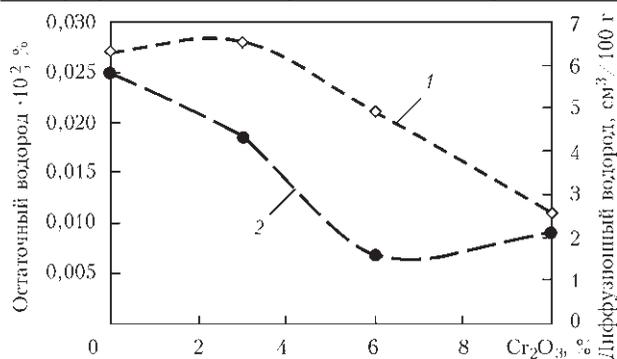


Рис. 2. Влияние оксида хрома на содержание остаточного (1) и диффузионного (2) водорода в наплавленном металле 05Х6МФ

С целью более эффективного снижения содержания углерода в наплавленный металл в состав покрытия дополнительно вводили оксиды хрома и циркония (см. табл. 2, варианты № 4–9). Это позволило снизить содержание углерода в наплавленном металле до 0,04 мас. % (см. табл. 3).

С целью обеспечения оптимальных сварочно-технологических свойств были проведены исследования по уточнению состава покрытия. При этом изучали влияние соотношения его компонентов на качество формирования шва при сварке в разных пространственных положениях, стабильность горения дуги, легкость удаления шлаковой корки и стойкость металла шва против образования пор. Оценку приведенных выше показателей проводили по пятибалльной системе. Содержание магнезита, флюорита и оксида хрома меняли в пределах, мас. %: 10...45 MgO, 10...45 CaF<sub>2</sub>, 1...15 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 1...15 ZrO<sub>2</sub>. Проведенные эксперименты показали, что соотношение магнезита и флюорита практически не влияет на стабильность горения дуги, но при содержании флюорита выше 35 мас. % или оксида хрома больше 10 мас. % ухудшается формирование шва при сварке в вертикальном положении. Отделимость шлаковой корки ухудшается при снижении оксида хрома менее чем 5 мас. % и повышении магнезита больше 20 мас. %, оптимальное содержание диоксида циркония составляет 2...6 мас. %.

Исследовано также влияние состава покрытия на содержание водорода в наплавленном металле. Проведенные эксперименты показали, что наиболее эффективным для снижения содержания диффузионного водорода является введение оксида хрома при соотношении содержания обожженного магнезита к флюориту как 1:2,5. Как видно из рис. 2, при этом снижается не только содержание диффузионного водорода, но и содержание остаточного, что объясня-

ется связыванием атомов водорода в нерастворимый в жидком металле гидроксил.

Таким образом, предложена новая фторидно-магнийоксидная шлаковая система, обеспечивающая содержание углерода в наплавленном металле на уровне 0,04...0,06 мас. % и диффузионного водорода на уровне 1,0 см<sup>3</sup>/100 г. Установлен оптимальный состав покрытия и изготовлена опытная партия электродов. Испытание сварочно-технологических свойств показало, что электроды обеспечивают стабильное горение дуги, незначительное разбрызгивание, хорошее формирование во всех пространственных положениях и легкую отделимость шлаковой корки. Типичный химический состав наплавленного металла, мас. %: 0,041 С; 0,23 Si; 0,47 Mn; 0,83 Mo; 0,25 V; 0,017 S; 0,026 P. Механические свойства наплавленного металла в состоянии после термообработки (760 °С, 2 ч) при температуре 20 °С характеризуются такими показателями:  $\sigma_{0,2} = 290$  МПа;  $\sigma_B = 515$  МПа;  $\delta = 30$  %;  $\psi = 65$  %;  $KCU = 62$  Дж/см<sup>2</sup>.

Разработанным электродам присвоена марка АНЛ-10 и подготовлены технические условия на их производство.

1. Скульский В. Ю., Царюк А. К. Новые теплоустойчивые стали для изготовления сварных узлов тепловых энергоблоков (Обзор) // Автомат. сварка. – 2004. – № 4. – С. 35–40.
2. Скульский В. Ю. Структура металла в зоне сплавления и ЗТВ сварных соединений высокохромистых теплоустойчивых сталей // Там же. – 2005. – № 5. – С. 15–23.
3. Ерохин А. А. Кинетика металлургических процессов дуговой сварки. – М.: Машиностроение, 1964. – 254 с.
4. Ерохин А. А., Кузнецов О. М. Электроды с безокислительным покрытием // Свароч. пр-во. – 1959. – № 12. – С. 1–4.
5. Ерохин А. А., Кузнецов О. М. Снижение содержания углерода в металле шва при сварке нержавеющей сталей // Автомат. сварка. – 1961. – № 11. – С. 1–4.
6. Соколов Е. В., Сидлин З. А., Ваганов И. М. Разработка электродов, обеспечивающих низкое содержание углерода в наплавленном металле аустенитного класса // Сварка конструкций из высоколегированных сталей. – Л.: ЛДНТП, 1968. – 55 с.
7. Каховский Н. И., Липодаев В. Н. Электроды для сварки хромоникелевой нержавеющей стали типа 18-10 с низким содержанием углерода // Автомат. сварка. – 1968. – № 12. – С. 8–10.
8. Каховский Н. И., Липодаев В. Н., Каховский Ю. Н. Снижение содержания углерода в металле шва при ручной дуговой сварке нержавеющей сталей // Там же. – 1970. – № 6. – С. 8–10.
9. Кнунянц И. Л. Краткая химическая энциклопедия. – М.: Сов. энцикл., 1967. – 384 с.
10. Роде Т. В. Кислородные соединения хрома и хромовые катализаторы. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 563 с.
11. Каховский Н. И., Липодаев В. Н., Захаров Л. С. Снижение содержания углерода в металле шва путем высокотемпературной прокатки компонентов электродного покрытия // Автомат. сварка. – 1977. – № 2. – С. 8–10.
12. Потапов Н. И. Окисление металлов при сварке плавлением. – М.: Машиностроение, 1985. – 126 с.

Поступила в редакцию 04.04.2014