

УДК 621.791.04

Шекшеев М.А., Язвенко А.М., Столяров А.Ю., Корчунов А.Г.

ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛЬНОЙ СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ НА ПАРАМЕТРЫ СВАРИВАЕМОСТИ

Аннотация. В статье приведены результаты аналитических исследований влияния химического состава некоторых марок стальных проволок на параметры свариваемости и механические свойства наплавленного металла. Показано, что проволоки для сварки низкоуглеродистых, низколегированных высокопрочных сталей выполняют преимущественно из сталей на кремний-марганцевой основе с добавлением никеля, молибдена и хрома. Для улучшения характеристик металла проволок и сварных швов к базовым составам сталей добавляют микролегующие компоненты, такие как титан и ванадий. Установлено, что стали для проволок по параметрам $UCS < 30$ и $HCS < 4$ не склонны к образованию горячих трещин при сварке. Оценка трещиностойкости по параметрам углеродного эквивалента $C_{экв} > 0,45$ и показателю $P_{см} > 0,23$ показала склонность рассматриваемых сталей к холодным трещинам при сварке. Это, прежде всего, связано со сложной химической композицией сталей, которая обеспечивает необходимый комплекс механических свойств сварных соединений. Оценка прочностных свойств наплавленного металла, полученного с помощью перспективной проволоки, показала, что значение временного сопротивления достигает 1079 МПа, а предел текучести находится на уровне 788 МПа. Прогнозируемый уровень прочностных свойств превышает регламентируемый стандартами AWS A5.18 и EN ISO 14171-A примерно в 1,6–2 раза.

Ключевые слова: сварка, наплавка, сварочная проволока, сварной шов, свариваемость, трещиностойкость, углеродный эквивалент, механические свойства

Введение

В условиях политики импортозамещения возросла потребность в сварочной проволоке с эксплуатационными характеристиками на уровне требований ведущих международных стандартов (табл. 1), которая применяется для сварки высокопрочных сталей, используемых при производстве труб большого диаметра нефтегазового сортамента, в ответственных сварных конструкциях в строительстве мостов и высотных зданий, кранов, судостроении, тяжелом машиностроении и в энергетике.

Такая сварочная проволока должна обеспечивать требуемые свойства металла сварного шва, которые строго регламентируются, например, для нефтегазовых трубопроводов, а также должна быть применима для сварки новых высокопрочных сталей (временное сопротивление разрыву не менее 700 МПа) с заданным уровнем свариваемости, показателей пластичности и ударной вязкости.

Среди прочих, наиболее важным технологическим свойством является свариваемость [1, 2]. Свариваемость – это комплексная характеристика как основного, так и присадочного материала, которая зависит

Таблица 1

Классификация высокопрочной сварочной проволоки по EN ISO 16834

Марка проволоки	OK Aristorod 55	OK Aristorod 69	OK Aristorod 79	OK Aristorod 89
Классификация по EN ISO 16834	EN ISO 16834-A: G Mn3NiCrMo	EN ISO 16834-A: G Mn3Ni1CrMo	EN ISO 16834-A: G Mn4Ni2CrMo	EN ISO 16834-A: G Mn4Ni2CrMo
Химический состав проволоки, %	C = 0,07-0,14 Mn = 1,3-1,8 Si = 0,60-0,80 Ni = 0,5-0,65 Cr = 0,4-0,65 Mo = 0,15-0,3 P _{max} 0,015 S _{max} 0,015	C max 0,1 Mn = 1,5-1,8 Si = 0,40-0,70 Ni = 1,2-1,6 Cr = 0,2-0,4 Mo = 0,2-0,3 V = 0,05-0,1 P _{max} 0,015 S _{max} 0,015	C = 0,08-0,12 Mn = 1,7-2,1 Si = 0,60-0,90 Ni = 1,8-2,3 Cr = 0,25-0,45 Mo = 0,45-0,65 P _{max} 0,015 S _{max} 0,018	C = 0,08-0,12 Mn = 1,6-2,1 Si = 0,60-0,90 Ni = 2,1-2,3 Cr = 0,25-0,45 Mo = 0,45-0,65 P _{max} 0,015 S _{max} 0,015
Тип сварки	G – дуговая сварка в среде защитных газов плавящимся электродом			
Наплавленный металл по EN ISO 16834	EN ISO 16834-A: G 55 4 M Mn3NiCrMo	EN ISO 16834-A: G 69 4 M Mn3Ni1CrMo	EN ISO 16834-A: G 79 4 M Mn4Ni2CrMo	EN ISO 16834-A: G 89 4 M Mn4Ni2CrMo
Защитный газ	M21 (80%Ar+20%CO ₂)			
Предел текучести наплавленного металла	Не менее 550 МПа	Не менее 690 МПа	Не менее 790 МПа	Не менее 890 МПа

от его состава и технологии производства, отражает реакцию данного материала на процесс сварки и определяет его пригодность для конкретных условий [3, 4].

На сегодняшний день ОАО «ММК-МЕТИЗ» является одним из лидеров метизной отрасли страны, имеющий многолетний опыт производства сварочной проволоки. Задача производства сварочной проволоки для сварки высокопрочных конструкций ответственного назначения была включена в программу освоения инновационных видов продукции предприятия и реализации инфраструктурных проектов крупнейших предприятий Челябинской области и Российской Федерации.

Учитывая вышеизложенное, целью настоящей работы является исследование влияния химического состава различных сталей, предназначенных для изготовления сварочной проволоки, на механические свойства наплавленного металла и параметры свариваемости.

Материалы и методы исследования

Склонность стали к образованию горячих трещин (ГТ) оценивали на основе расчета показателей трещиностойкости HCS (показатель К. Итамуры) [5] и UCS (Европейский стандарт EN 1011-2 : 2001):

$$HCS = \frac{C \cdot (S + P + Si / 25 + 0,01 \cdot Ni) \cdot 10^3}{3 \cdot Mn + Cr + Mo + V}, \quad (1)$$

$$UCS = 230 \cdot C + 190 \cdot S + 75 \cdot P + 45 \cdot Nb + 12,3 \cdot Si - 5,4 \cdot Mn - 1. \quad (2)$$

Если параметр $HCS > 4$, то сталь считается склонной к образованию ГТ. Если параметр $UCS > 30$, то сталь также считается склонной к ГТ при сварке.

Для оценки склонности стали к образованию холодных трещин (ХТ) может быть использован комплексный параметр P_{cm} (показатель Ито-Бессии) [6]:

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo + V}{15} + 5 \cdot B. \quad (3)$$

Однако наиболее широкое применение для оценки свариваемости углеродистых и низколегированных сталей получил параметр углеродного эквивалента $C_{эКВ}$. Данный параметр регламентируется стандартами различных стран и организаций, при этом существует множество уравнений для определения $C_{эКВ}$. В своей работе мы использовали наиболее известные зависимости, применяемые в практике сварки.

Согласно ГОСТ 27772 – 2015 для низколегированных сталей эквивалент углерода вычисляется по формуле

$$C_{эКВ} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2}. \quad (4)$$

Считается, что при $C_{эКВ} \geq 0,35\%$ стали потенциально склонны к образованию ХТ. При $C_{эКВ} \geq 0,40\%$

при сварке становится возможным образование закалочных структур в металле сварного соединения.

Для сталей, содержащих микролегирующие компоненты, может быть применена формула (СТО Газпром) [7]:

$$C_{эКВ} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + \Sigma(V + Ti + Nb)}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} + 15 \cdot B. \quad (5)$$

При $C_{эКВ} = 0,40-0,45\%$ сталь склонна к образованию ХТ, что требует изменения технологии сварки.

Метод Британской ассоциации (BWRA) также регламентирует параметр $C_{эКВ}$:

$$C_{эКВ} = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{10} + \frac{V}{10} + \frac{Ni}{15}. \quad (6)$$

При $C_{эКВ} < 0,25\%$ сталь не склонна к образованию ХТ и сваривается без подогрева; при $C_{эКВ} \leq 0,30\%$ сталь склонна к образованию ХТ и сваривается с предварительным подогревом от 50 до 125°C; при $C_{эКВ} \leq 0,35\%$ сваривается с подогревом от 50 до 175°C; при $C_{эКВ} \leq 0,40\%$ сваривается с подогревом от 75 до 200°C; при $C_{эКВ} \leq 0,45\%$ сваривается с подогревом от 100 до 225°C.

Согласно требованиям «Международного института сварки» (МИС), эквивалент углерода определяется по следующему уравнению:

$$C_{эКВ} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}. \quad (7)$$

Использование вышеприведенных зависимостей позволяет ориентировочно оценить склонность сталей к образованию того или иного типа трещин при сварке.

В исследованиях использовали данные химического состава катанки диаметром 8,0 мм из инновационной стали марки 10Г2СН2,5ХМ производства ООО «Златоустовский металлургический завод», которая была произведена впервые по заказу ОАО «ММК-МЕТИЗ».

Определение временного сопротивления и предела текучести наплавленного металла осуществляли расчетным методом по следующим зависимостям [8]:

– временное сопротивление разрыву σ_B , МПа:

$$\sigma_B = (4,8 + 50 \cdot C + 25,2 \cdot Mn + 17,5 \cdot Si + 23,9 \cdot Cr + 7,7 \cdot Ni + 8 \cdot W + 70 \cdot Ti + 17,6 \cdot Cu + 29 \cdot Al + 16,8 \cdot Mo) \cdot 10; \quad (8)$$

– предел текучести σ_T , МПа:

$$\sigma_T = 0,73 \cdot \sigma_B. \quad (9)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки свариваемости металла сварных швов высокопрочных трубных сталей были рассмотрены химические составы марок сталей, которые

применяют для изготовления проволоки, используемой для сварки высокопрочных сталей (табл. 2).

Анализ химического состава показал, что в рассматриваемых марках в качестве основных легирующих элементов преобладают кремний, марганец, никель, хром и молибден (рис. 1). В качестве микролегирующих добавок можно выделить добавки титана в количестве до 0,15 %.

Анализ свариваемости сталей (табл. 3), на основе решения параметрических уравнений UCS и HCS, показал (рис. 2), что рассматриваемые марки не склонны к образованию горячих трещин при сварке.

Результаты расчета параметров углеродного эк-

вивалента $C_{экв}$ и показателя Ито-Бессю $P_{см}$ (рис. 3) показали повышенную склонность рассматриваемых сталей к образованию холодных трещин при сварке и после ее окончания. Это связано со сложной химической композицией сталей, которая обеспечивает необходимый комплекс механических свойств сварных соединений. Однако при выполнении многослойных сварных швов негативный эффект может нивелироваться за счет эффекта автотермообработки, а также за счет применения дополнительных технологических операций, таких как предварительный и сопутствующий подогрев соединения [9,10].

Таблица 2

Химический состав различных сталей, предназначенных для изготовления сварочной проволоки

Марка	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al	Ti	Nb	W	N	B
S3Ni1Mo	0,15	0,3	2,4	0,008	0,012	0,2	1,1	0,3	0,65	-	-	0,1	-	-	0,007	-
S3NiCrMo	0,15	0,3	1,9	0,015	0,015	0,55	2,25	0,35	0,65	-	-	0,1	-	-	-	-
S3MoTiB	0,08	0,3	1,1	0,003	0,015	0,05	0,7	0,1	0,7	-	-	0,15	-	-	0,008	0,015
Mn3Ni1CrMo	0,1	0,7	1,8	0,015	0,015	0,4	1,6	0,25	0,3	-	-	0,04	-	-	0,01	-
Mn4Ni2CrMo	0,12	0,9	2,1	0,015	0,015	0,45	2,3	0,1	0,65	-	-	0,1	-	-	0,008	-
10Г2СН2,5ХМ	0,11	0,7	1,84	0,005	0,012	0,39	2,56	0,08	0,47	0,008	0,020	0,002	-	-	0,01	-

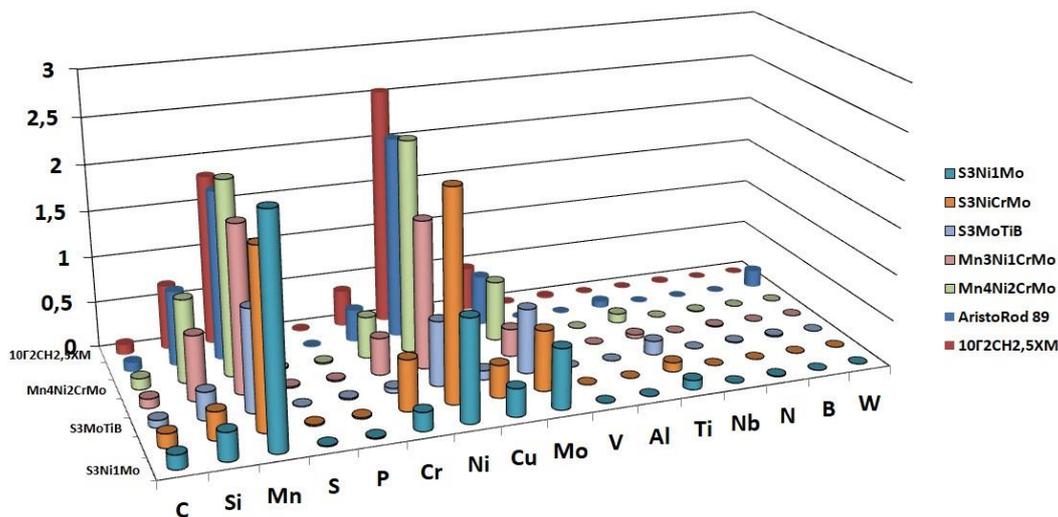


Рис. 1. Химический состав различных сталей, предназначенных для изготовления сварочной проволоки

Таблица 3

Результаты расчета параметров, характеризующих свариваемость сталей

Марка	$C_{экв}$				Показатель Ито-Бессю $P_{см}$	EN 1011-2:2001 UCS	Показатель К. Игамуры HCS
	по ГОСТ 27772-2015	по BWRA	СТО-Газпром	МИС			
S3Ni1Mo	0,82	0,43	0,83	0,81	0,37	19,27	0,80
S3NiCrMo	0,84	0,52	0,90	0,88	0,38	23,53	1,40
S3MoTiB	0,49	0,26	0,72	0,47	0,29	9,47	0,73
Mn3Ni1CrMo	0,65	0,37	0,67	0,66	0,29	7,65	1,21
Mn4Ni2CrMo	0,83	0,49	0,87	0,85	0,36	8,17	1,44
10Г2СН2,5ХМ	0,72	0,46	0,77	0,77	0,32	7,60	1,22

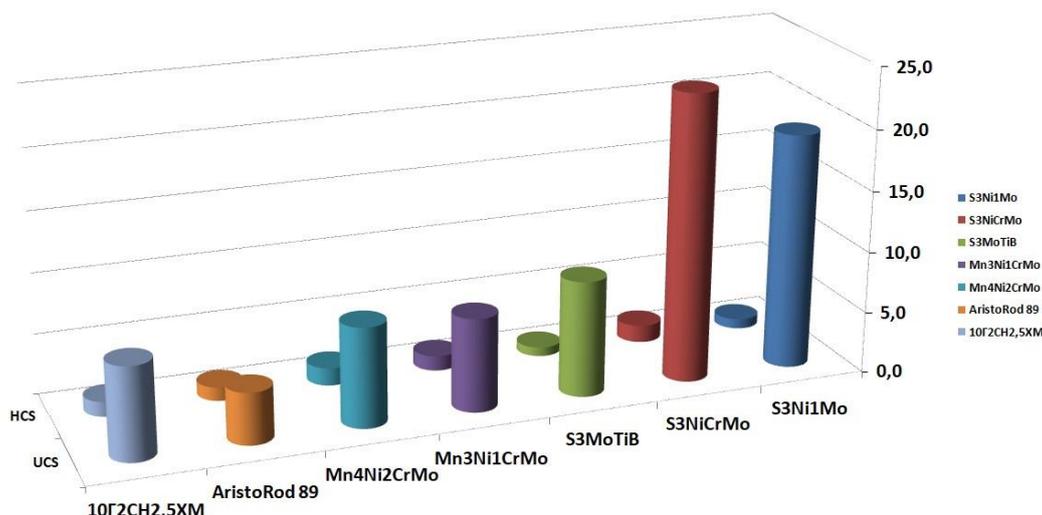


Рис. 2. Результаты расчета склонности сталей к образованию горячих трещин при сварке

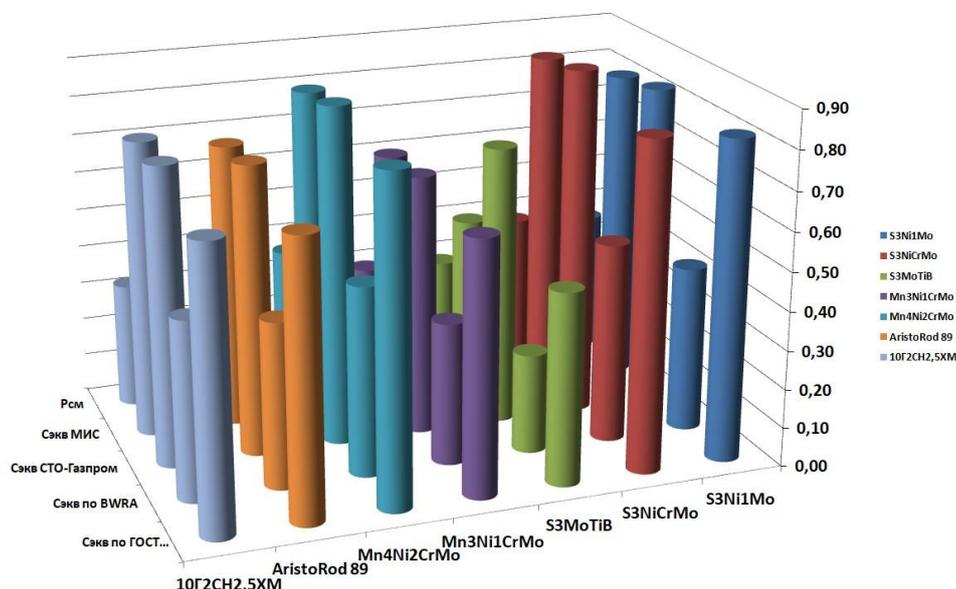


Рис. 3. Результаты расчета склонности сталей к образованию холодных трещин при сварке

На основании проведенного анализа можно заключить, что марки сталей, предназначенные для изготовления сварочной проволоки, применяемой для сварки высокопрочных сталей, обладают пониженной склонностью к образованию горячих трещин при сварке. Если учитывать параметры углеродного эквивалента, то свариваемость рассматриваемых сталей ниже и они проявляют склонность к образованию холодных трещин при сварке и после ее окончания.

Подставив значения химического состава различных марок сталей из табл. 2 в уравнения (8) и (9), получили ориентировочные данные по уровню прочностных свойств металла сварных швов, обеспечиваемых данными сталями (табл. 4).

Результаты расчетов прочностных свойств стали 10Г2СН2,5ХМ показали, что параметр $\sigma_b \sim 1079$ МПа, а параметр $\sigma_T \sim 788$ МПа.

Таблица 4

Прочностные характеристики металла сварных швов низколегированных высокопрочных сталей

Марка	σ_b , МПа	σ_T , МПа
S3Ni1Mo	1144	835
S3NiCrMo	1199	875
S3MoTiB	723	528
Mn3Ni1CrMo	1015	741
Mn4Ni2CrMo	1276	931
10Г2СН2,5ХМ	1079	788

Если опираться на требования стандарта AWS A5.28, то данная сталь по параметру σ_b попадает в категорию 79 ($880 \geq \sigma_b \leq 1080$ МПа) и 89 ($940 \geq \sigma_b \leq 1180$ МПа), а по параметру σ_T близка к категории 79 ($\sigma_T = 790$ МПа).

При учете требований стандарта ISO 16834 по прочностным свойствам данная сталь попадает в категорию ER 120 S - G.

В сравнении со сталями из табл. 2, сталь 10Г2СН2,5ХМ по прочностным свойствам наиболее близка к марке Mn3Ni1CrMo (разница в большую сторону по $\sigma_b \sim 6\%$, по $\sigma_T \sim 6\%$), которые предназначены для сварки высокопрочных низкоуглеродистых, низколегированных сталей.

Необходимо отметить, что расчеты учитывают только состав проволок, а не самого наплавленного металла, без учета выгорания элементов и подмешивания компонентов основного металла во время процессов сварки.

Выводы

Таким образом, на основании результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проволоки для сварки низкоуглеродистых, низколегированных высокопрочных сталей различные производители выполняют из сталей на кремний-марганцевой основе с добавлением в качестве основных легирующих элементов никеля, молибдена и хрома. Для улучшения характеристик металла проволок и сварных швов к базовым составам сталей добавляют микролегирующие компоненты, такие как титан и ванадий.

2. Анализ свариваемости сталей для проволок, предназначенных для сварки низкоуглеродистых, низколегированных высокопрочных сталей, показал, что они по параметрам UCS < 30 и HCS < 4 не склонны к образованию горячих трещин при сварке. Оценка трещиностойкости по параметрам углеродного эквивалента $C_{э\text{кв}} > 0,45$ и показателю $P_{\text{см}} > 0,23$ установила склонность рассматриваемых сталей к холодным трещинам при сварке. Это связано со сложной химической композицией сталей, которая обеспечивает необходимый комплекс механических свойств сварных соединений. Однако при выполнении многослойных сварных швов негативный эффект нивелируется за счет эффекта автотермообработки, а также за счет применения дополнительных технологических операций, таких как предварительный и сопутствующий подогрев соединения.

3. Расчетная оценка прочностных свойств наплавленного металла, полученного с помощью перспективной проволоки, показала, что значение σ_b до-

стигает 1079 МПа, σ_T находится на уровне 788 МПа. Таким образом, прогнозируемый уровень прочностных свойств металла шва превышает регламентируемый стандартами AWS A5.18 и EN ISO 14171-A примерно 1,6–2 раза.

Список источников

1. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 549 с.
2. Традиционные и перспективные стали для строительства магистральных газонефтепроводов / Ефименко Л.А., Елагина О.Ю., Вышемирский Е.М., Капустин О.Е., Мурадов А.В., Прыгаев А.К. Москва: Логос, 2011. 304 с.
3. Шоршоров М.Х., Чернышова Т.А., Красовский А.И. Испытания металлов на свариваемость. Москва: Металлургия, 1972. 240 с.
4. Емелюшин А.Н., Сычков А.Б., Шекшеев М.А. Исследование свариваемости высокопрочной трубной стали класса прочности K56 // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 3. С. 26-30.
5. Ефименко Л.А., Елагина О.Ю., Вышемирский Е.М. Особенности подхода к оценке свариваемости низкоуглеродистых высокопрочных трубных сталей // Сварочное производство. 2010. №5. С. 5–11.
6. Сварка. Резка. Контроль: справочник. В 2-х т. / под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. М.: Машиностроение, 2004. Т.1. 624 с.
7. Исследование свариваемости высокопрочных трубных сталей категории прочности X80 / Ефименко Л.А., Елагина О.Ю., Капустин О.Е., Вышемирский Е.М. // Сварочное производство. 2009. №2. С. 3–7.
8. Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П. Технология и оборудование сварки плавлением. М.: Машиностроение, 1977. 432 с.
9. Yemelyushin A.N., Sychkov A.B., Manin V.P., Shekshyev M.A. Investigation of the structure and mechanical properties of welded joints in steels of the K56 strength grade in different welding conditions // Welding International. 2014, vol. 28, no. 1, pp. 70-74.
10. Особенности формирования структуры и свойств сварных соединений стали класса прочности K56 при дуговой сварке / Емелюшин А.Н., Сычков А.Б., Завалищин А.Н., Шекшеев М.А. // Черные металлы. 2013. № 8 (980). С. 18-22.

Сведения об авторах

Шекшеев Максим Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: shecsheev@yandex.ru.

Язвенко Андрей Михайлович – главный специалист технологического центра ОАО «ММК-МЕТИЗ», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: yazvenko.am@mmk-metiz.ru

Столяров Алексей Юрьевич – кандидат технических наук, начальник технологического центра – главный технолог, ОАО «ММК-МЕТИЗ», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: stolyarov.ay@mmk-metiz.ru

Корчунов Алексей Георгиевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: agkorchunov@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EFFECTS OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF STEEL WELDING WIRE ON WELDABILITY PARAMETERS

Sheksheev Maxim A. – PhD (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sheksheev@yandex.ru.

Yazvenko Andrey M. – Chief Specialist of the Technology Center of OJSC MMK-METIZ, Magnitogorsk, Russia. E-mail: yazvenko.am@mmk-metiz.ru

Stolyarov Alexey Yu. – PhD (Eng.), Head of the Technology Center – Chief Technologist, OJSC MMK-METIZ, Magnitogorsk, Russia. E-mail: stolyarov.ay@mmk-metiz.ru

Korchunov Alexey G. – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: agkorchunov@mail.ru.

Abstracts. The article presents the results of analytical studies of the effect of the chemical composition of certain grades of steel wires on the weldability parameters and mechanical properties of the deposited metal. It is shown that wires for welding low-carbon, low-alloy high-strength steels are made mainly of silicon-manganese-based steels with the addition of nickel, molybdenum and chromium. To improve the metal characteristics of wires and welds, microalloying components such as titanium and vanadium are added to the basic steel compositions. It has been established that wire steels according to the parameters $UCS < 30$ and $HCS < 4$ are not prone to the formation of hot cracks during welding. The assessment of crack resistance based on the parameters of the carbon equivalent $C_{eqv} > 0.45$ and the index $P_{cm} > 0.23$ showed the tendency of the steels under consideration to cold cracks during welding. This is primarily due to the complex chemical composition of the steels, which provides the necessary set of mechanical properties of the welded joints. An assessment of the strength properties of the deposited metal obtained using a promising wire showed that the value of the temporary resistance reaches 1079 MPa, and the yield strength is at the level of 788 MPa. The predicted level of strength properties exceeds those regulated by AWS A5.18 and EN ISO 14171-A standards by about 1.6 – 2 times.

Keywords: welding, surfacing, welding wire, weld, weldability, crack resistance, carbon equivalent, mechanical properties

Ссылка на статью:

Влияния химического состава стальной сварочной проволоки на параметры свариваемости / Шекшеев М.А., Язвенко А.М., Столяров А.Ю., Корчунов А.Г. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №3(54). С. 31-36.

Sheksheev M.A., Yazvenko A.M., Stolyarov A.Yu., Korchunov A.G. Effects of the chemical composition of steel welding wire on weldability parameters. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 54, no. 3, pp. 31-36.