

## ВЫБОР ЗАЩИТНОГО ГАЗА ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ

В. П. ЕЛАГИН

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

Механизированная многослойная сварка МИГ/МАГ с использованием высоколегированных проволок сопряжена с возможностью обраования в металле шва несплавлений и зашлаковок. Поэтому совершенствование технологии, в частности, выбор состава защитного газа является актуальным. Показана возможность применения при механизированной дуговой сварке разнородных сталей в качестве защитного газа смесей  $\text{CO}_2+3\% \text{N}_2$  и  $\text{CO}_2+3\% \text{N}_2+0,5\% \text{O}_2$ . Показано, что окисление металла происходит преимущественно в междендритных областях, интенсивность которого усиливается при увеличении количества никеля в сварочной проволоке. Легирование металла шва азотом не изменяет интенсивность процесса окисления металла и практически не влияет на отделимость шлаковой корки с поверхности наплавленного металла. Библиогр. 17, табл. 2, рис. 3.

*Ключевые слова:* механизированная дуговая сварка, защитный газ,  $\text{CO}_2$ , азот, газовые смеси высоколегированный металл шва, шлаковая корка, шпинели, легирование азотом

Особенностью механизированной дуговой сварки высоколегированной проволокой в защитном газе является высокая склонность металла к окислению в сварочной зоне и образованию в шве несплавлений и зашлаковок [1]. При сварке в среде аргона этому способствует низкая стабильность сварочной дуги, приводящая к нарушению процесса сварки и газовой защиты, а в смеси аргона с  $\text{CO}_2$  или с кислородом — окисление металла самим защитным газом. Применяются для защиты зоны сварки и азотосодержащий газ — азот [2], смеси аргона или  $\text{CO}_2$  с азотом [3] или с воздухом [4, 5], но при этом, кроме того, возникает опасность образования пор в шве [4, 6]. Большой выбор разных составов защитных газов для практически похожих технологических вариантов свидетельствует о том, что разработка газовых смесей, а также развитие теории процесса сварки в защитном газе еще продолжают, что подтверждается многочисленными публикациями на эту тему [7, 8].

Кроме состава защитного газа на качество швов большое влияние оказывает и состав электродной проволоки. Выбор ее, как правило, определяется условиями эксплуатации сварного соединения. Для сварки разнородных сталей разработаны сварочные проволоки типа 08X20H-25M3Г2, 08X25H40M8Г2 и 08X25H60M10Г2 [9]. Повышенное содержание хрома и молибдена в них предназначено для предотвращения образования горячих трещин в шве, а никеля — для снижения толщины мартенситной прослойки в зоне сплавления с перлитной сталью и торможения развития структурной неоднородности в

этой зоне при эксплуатационном нагреве [1]. Однако, хром и молибден при окислении образуют шпинели типа  $\text{MeR}_2\text{O}_4$ , где в качестве Me выступают элементы Fe, Mn, Mg, а в качестве R — Al, Cr, V, Mo [10], находящиеся в твердом растворе металла проволоки. Высказано предположение, что при этом создается переходной слой между шлаком и поверхностью шва, который способствует их прочному соединению [11]. Известна сварочная высоколегированная проволока типа 08X20H9Г7Т, которая была разработана для сварки в  $\text{CO}_2$  высокопрочных сталей [12]. Она нашла успешное применение и для сварки разнородных сталей [13]. Отличительной особенностью ее состава является пониженное содержание никеля в ней и шпинелеобразующих элементов, а также наличие активных элементов-раскислителей, таких как кремний, титан, марганец, что позволяет получить металл шва без дефектов за счет самоотделения шлаковой корки с поверхности наплавленного металла при охлаждении. Недостаточное содержание аустенизирующих элементов в этой проволоке ограничивает ее применение для сварки разнородных сталей из-за образования и развития структурной неоднородности в зоне сплавления с перлитной сталью [1].

В ИЭС им. Е. О. Патона было установлено [14], что дополнительное легирование аустенитного металла шва азотом при сварке разнородных сталей позволяет, как и легирование никелем, снизить развитие структурной неоднородности в зоне сплавления с перлитной сталью. Это объясняется как аустенизирующей способностью азота, так и его влиянием на снижение диффузии углерода. Кроме этого, азот защищает высоколегированный

металл от окисления и обеспечивает высокую стабильность процесса сварки, что предотвращает образование на поверхности шва шлаковой корки, а в металле шва — несплавлений и зашлаковок [2]. Однако в зоне сплавления с перлитной сталью могут образовываться поры [15–17], которые невозможно предотвратить при снижении количества азота даже до 0,5 % в смеси его с аргонem. Устранить образование пор позволяет добавка к  $\text{CO}_2$  азота или воздуха до 14 % с легированием металла шва азотом в количестве до 0,40 % [17]. Полученные результаты были использованы в технологии дуговой сварки теплоустойчивых сталей нефтеперерабатывающего оборудования с применением электродной проволоки 08X20H9Г7Т [13]. Представляет интерес исследовать влияние азота в составе газовой смеси  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  на окисление высоколегированного металла шва и отделимость шлаковой корки при сварке электродными проволоками типа 08X20H25M3Г2 и 08X25H40M6Г2, рекомендованных для сварки разнородных сталей.

С этой целью производили однослойные наплавки вышеназванными проволоками диаметром 2,0 мм на пластины, расположенные под различными углами к горизонту, а также многослойную сварку пластин толщиной 22 мм из стали 12Х5М многослойными швами в  $\text{CO}_2$  и его смесях с азотом и кислородом. Для сравнения выполняли также наплавки сварочной проволокой типа 08X20H9Г7Т, образующей при сварке в  $\text{CO}_2$  шлаковую корку, обладающей хорошей отделимостью.

Наплавки и многослойные швы выполнялись сварочным автоматом АДГ-502 при питании сварочной дуги постоянным током обратной полярности от выпрямителя ВДУ-504. Ток сварки —

220...320 А, напряжение на дуге — 24...28 В и скорость сварки — 14...20 м/ч, расход защитного газа — 12 л/мин.

Влияние составов защитного газа и сварочной проволоки на окисление металла и отделимость шлаковой корки оценивали отношением общего количества шлака, которое собирали после тщательной механической очистки поверхности наплавки к количеству шлака, самоотделившегося от поверхности наплавленного металла в процессе охлаждения. Результаты приведены в табл. 1, а общий вид поверхности наплавки до и после очистки показан на рис. 1, а–г.

Как видно из рис. 1 поверхности наплавки до и после очистки, а также имеющаяся на ней шлаковая корка существенно отличаются. Поверхности наплавки, выполненных с применением сварочной проволоки 08X20H9Г7Т имеют меньшую шероховатость, но покрыты более толстым слоем стеклоподобного шлака, который самостоятельно отделяется от поверхности металла при охлаждении (рис. 1, а). После механической зачистки от остатков шлака обнажается светлая поверхность наплавки (рис. 1, б). На поверхности же наплавки, выполненных с применением сварочной проволокой 08X20H25M6Г7 шлаковая корка обладает частичной отделимостью при охлаждении и труднее удаляется при механической зачистке, а с применением проволоки типа 08X25H40M6Г2 она самостоятельно практически не отделяется. После механической зачистки наплавленная поверхность остается темной и имеет значительную шероховатость из-за наличия бугорков металла (рис. 1, в, г). Наибольшее количество шлака образуется на поверхности наплавки, выполненных с применением проволоки 08X20H9Г7Т и оно снижается с увели-

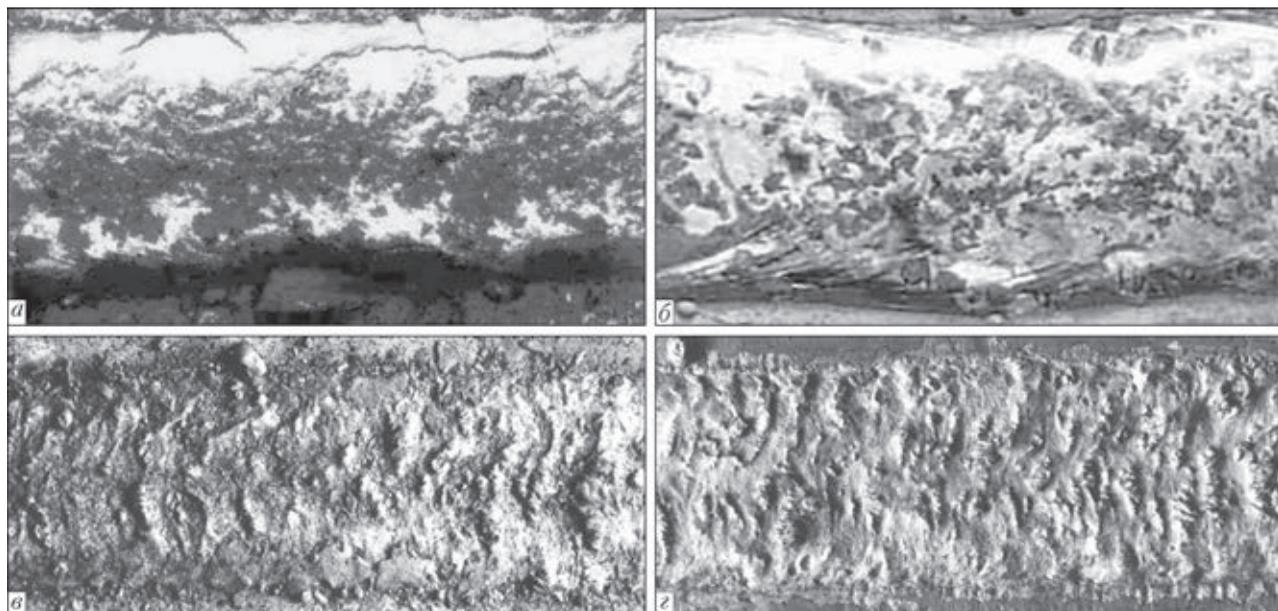


Рис. 1. Общий вид поверхности наплавки, выполненных дуговой сваркой в  $\text{CO}_2+3\% \text{N}_2$  проволоками 08X20H9Г7Т (а, б) и 08X25H40M6Г2 (в, г); а, в — до и б, г — после очистки,  $\times 2$

Таблица 1. Состав шлаковой корки, образующейся на поверхности металла шва

Сварочная проволока	Состав защитного газа	FeO	SiO <sub>2</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	MoO <sub>3</sub>	NiO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Количество* шлака, ×10 <sup>-3</sup> г/мм <sup>2</sup>
08X20H9Г7Т	CO <sub>2</sub>	0,7	12,3	38,5	19,4	-	-	12,8	$\frac{12,9(11,5)}{1,12}$
	CO <sub>2</sub> +3 % N <sub>2</sub>	0,6	8,3	32,2	11,3	-	-	6,4	$\frac{10,5(9,3)}{1,13}$
	CO <sub>2</sub> +3 % N <sub>2</sub> + 0,5 % O <sub>2</sub>	0,7	11,4	36,8	17,4	-	-	11,4	$\frac{12,7(10,8)}{1,17}$
08X20H25M6Г7	CO <sub>2</sub>	16,5	5,6	38,5	16,5	1,6	3,25	26,5	$\frac{10,1(5,11)}{1,97}$
	CO <sub>2</sub> +3 % N <sub>2</sub>	15,4	4,4	33,2	12,5	0,8	3,1	22,4	$\frac{7,8(4,11)}{1,89}$
	CO <sub>2</sub> +3 % N <sub>2</sub> + 0,5 % O <sub>2</sub>	17,3	6,7	39,1	17,6	1,4	2,2	21,5	$\frac{8,5(3,6)}{2,36}$
08X25H40M6Г2	CO <sub>2</sub>	22	3,8	10,4	5,06	3,2	5,12	46,5	$\frac{8,41(0,2)}{42,1}$
	CO <sub>2</sub> +3 % N <sub>2</sub>	19,3	2,8	9,7	3,3	2,3	4,2	38,3	$\frac{5,2(0)}{-}$
	CO <sub>2</sub> +3 % N <sub>2</sub> + 0,5 % O <sub>2</sub>	21	3,2	6,4	4,4	3,1	4,8	44,3	$\frac{7,3(0)}{-}$

\* — в числителе приведены общее и самоотделившееся (в скобках) количество шлака, а в знаменателе — их соотношение.

чением уровня легирования сварочных проволок. Добавка азота в состав защитного газа снижает количество шлака, а кислорода — увеличивает, но это заметно не отражается на его отделимости (табл. 1).

Изменения элементного состава шлака определяли рентгеноспектральным флуоресцентным методом на квантометре КРФ-18. В шлаке, обладающем хорошей и частичной отделимостью, зна-

чительно больше оксидов кремния, марганца и титана и меньше оксидов железа и хрома. Обращает внимание, что с увеличением количества никеля в составе проволок 08X20H25M6Г7 и 08X25H40M6Г2, растет количество в составе шлака оксидов железа и никеля. Видимо, это происходит вследствие протекания на поверхности металла кремне-марганцевосстановительных процессов, которые можно описать уравнениями [10]:

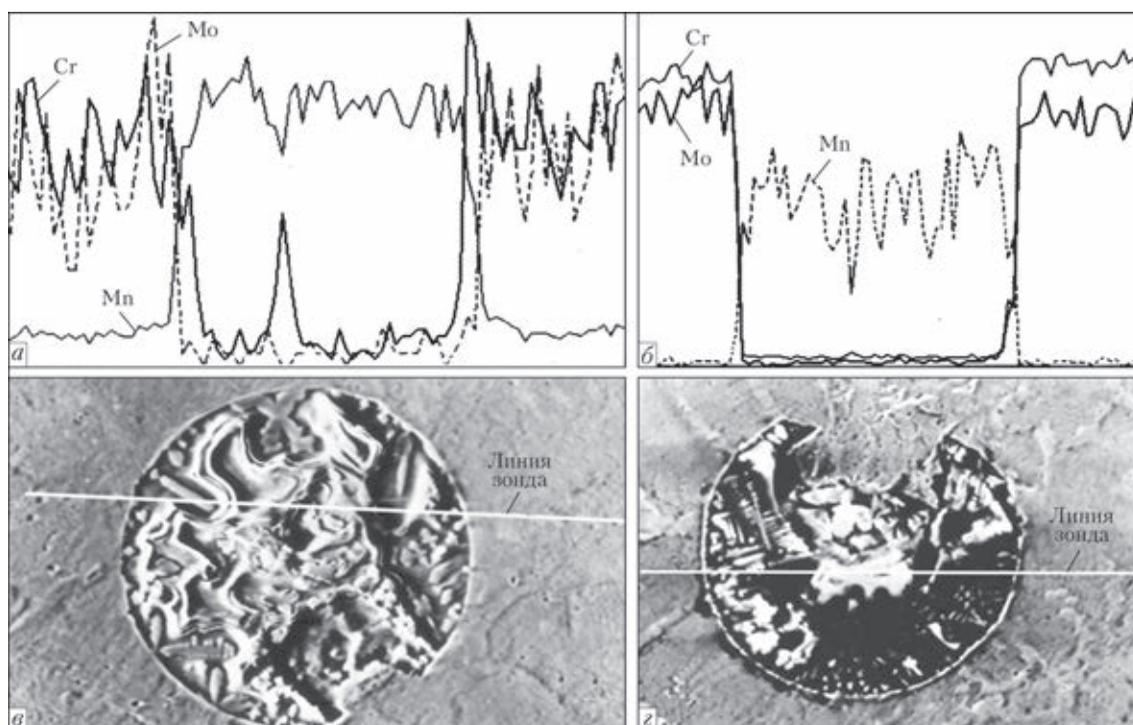


Рис. 2. Распределение химических элементов поперек неметаллического включения, расположенного в подповерхностном участке (а, в) и нижней части наплавки, ×1000 (б, г)

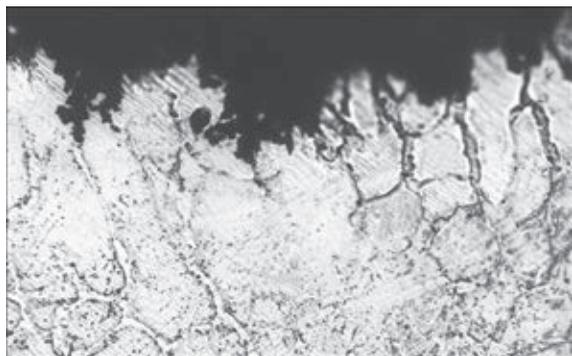
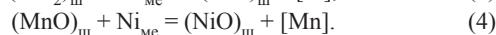
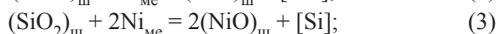
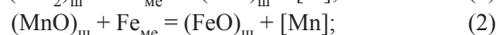
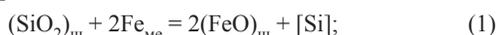


Рис. 3. Микроструктура (×400) подповерхностного участка металла, наплавленного проволокой 08X25H40M6Г2 в смеси CO<sub>2</sub> + 3 % N<sub>2</sub>



То есть, можно предположить, что с увеличением содержания никеля в металле усиливается интенсивность протекания процессов окисления поверхности металла с образованием тонкой оксидной пленки. Находящиеся в шлаке оксиды хрома и молибдена вступают с ней во взаимодействие, образуя хромо- и молибденовые шпинели, прочно соединенные с поверхностью металла.

Для подтверждения этого было исследовано распределение химических элементов между металлом и неметаллическим включением микрорентгеноспектральным анализом с помощью растрового микроскопа-микроанализатора «Сamebax SX-50». Исследования проводили на подповерхностном участке, расположенном на расстоянии 0,2 мм от поверхности со шлаком и участке, расположенном в нижнем сечении валика, наплавленного с применением проволоки 08X25H40M6Г2 в CO<sub>2</sub>. Результаты исследований представлены на рис. 2, а, б. В табл. 2 приведе-

на микрохимическая неоднородность и изменение степени ликвации элементов в подповерхностном участке на расстоянии 0,1...0,2 мм от поверхности и в нижней части наплавки.

Неметаллическое включение, расположенное в подповерхностном участке, не имеет зазора с металлом по всему его периметру (рис. 2, а). При этом, на участках перехода от металла к включению кривых распределения хрома и молибдена имеются пики, свидетельствующие о повышенном содержании этих элементов. Такого местного повышения их количества на участке перехода от металла к неметаллическому включению, расположенного в нижней части наплавки, не наблюдается и, кроме того, оно на большей части периметра имеет зазор с металлом (рис. 2, б).

Повышенное количества хрома и молибдена на участках перехода от металла к включению в подповерхностной зоне свидетельствует о большей длительности высокотемпературного нагрева металла этой зоны, при котором происходит перемещение этих элементов к участкам протекания интенсивных окислительно-восстановительных процессов. Это подтверждают и результаты исследований химической микронеоднородности, приведенные в табл. 2.

Металл подповерхностного участка по сравнению с нижним участком обеднен углеродом, кремнием, марганцем и хромом, но обогащен молибденом и никелем, при этом степень ликвации практически всех элементов в металле вблизи поверхности более высокая из-за большего количества их в междендритных областях, чем в теле дендрита. Об этом свидетельствует и микроструктура подповерхностного участка (рис. 3). В слое металла толщиной до 0,5 мм наблюдается укрупнение междендритных областей и образование в них участков окисления. Это согласуется с ре-

Таблица 2. Микрохимическая неоднородность участков металла наплавленного проволокой типа 08X20H25M6Г7 в CO<sub>2</sub> и в смеси CO<sub>2</sub> +3 % N<sub>2</sub>

Исследуемый объект			Содержание элементов, мас. %						
			C	Si	Mo	Cr	Mn	Ni	Fe
Наплавка в CO <sub>2</sub>	Подповерхностная часть валика	Междендритная область (C <sub>гр</sub> )	0,283	0,216	5,65	10,28	3,12	14,1	67,6
		Дендрит (C <sub>r</sub> )	0,075	0,13	3,086	9,09	2,23	13,69	73,13
		Степень ликвации (C <sub>гр</sub> /C <sub>r</sub> )	3,77	1,66	1,83	1,13	1,4	1,03	0,92
	Нижняя часть валика	Междендритная область (C <sub>гр</sub> )	0,501	0,257	3,78	11,02	4,23	13,78	68,35
		Дендрит (C <sub>r</sub> )	0,19	0,185	2,79	10,31	3,4	13,1	72,53
		Степень ликвации (C <sub>гр</sub> /C <sub>r</sub> )	2,62	1,39	1,41	1,07	1,24	1,05	0,94
Наплавка в смеси CO <sub>2</sub> +3 % N <sub>2</sub>	Подповерхностная часть валика	Междендритная область (C <sub>гр</sub> )	0,203	0,156	5,35	9,05	3,08	13,5	63,6
		Дендрит (C <sub>r</sub> )	0,065	0,11	3,186	8,03	2,36	12,91	70,63
		Степень ликвации (C <sub>гр</sub> /C <sub>r</sub> )	3,53	1,41	1,68	1,127	1,30	1,046	0,90
	Нижняя часть валика	Междендритная область (C <sub>гр</sub> )	0,491	0,223	4,73	11,02	3,93	13,55	69,88
		Дендрит (C <sub>r</sub> )	0,187	0,175	2,51	10,11	3,1	12,9	71,54
		Степень ликвации (C <sub>гр</sub> /C <sub>r</sub> )	2,62	1,27	1,48	1,09	1,26	1,05	0,97

зультатами исследований микрохимической неоднородности, приведенных в табл. 2. Легирование металла азотом на микрохимическую неоднородность исследуемых участков практически не повлияло.

Таким образом, можно утверждать, что окислительно-восстановительные процессы протекают преимущественно по междендритным областям аустенитного металла шва в подповерхностном участке. Повышение количества никеля в металле усиливает их интенсивность с образованием оксидов хрома и молибдена шпинельного типа, что ухудшает делимость шлаковой корки. Легирование металла азотом существенно на эти процессы не влияет и поэтому не ухудшает делимость шлаковой корки.

### Выводы

1. Показана возможность применения в качестве защитного газа смесей  $\text{CO}_2 + 3\% \text{N}_2$  и  $\text{CO}_2 + 3\% \text{N}_2 + 0,5\% \text{O}_2$  при механизированной сварке разнородных сталей.

2. При сварке электродной проволокой типа 08Х20Н9Г7Т в защитных газовых смесях  $\text{CO}_2 + 3\% \text{N}_2$  и  $\text{CO}_2 + 3\% \text{N}_2 + 0,5\% \text{O}_2$ , образующаяся шлаковая корка самостоятельно отделяется от поверхности шва и обеспечивается выполнение сварного шва без несплавлений и зашлаковок.

3. Более высокое содержание в сварочных проволоках никеля, а также наличие молибдена ухудшают делимость шлаковой корки вследствие усиления интенсивности окислительно-восстановительных процессов преимущественно в междендритных областях аустенитного металла шва и образования оксидов хрома и молибдена шпинельного типа. Выполнение бездефектного шва в этом случае возможно только при условии тщательной механической послышной зачистки поверхности шва.

4. Легирование металла азотом существенно не влияет на протекание окислительно-восстановительных процессов на поверхности аустенитного

металла шва и поэтому не ухудшает делимость шлаковой корки.

1. Сварка перлитных сталей аустенитными материалами / Ю. Н. Готальский // Отв. ред. К. А. Ющенко. – Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. – Киев: Наук. думка, 1992. – 224 с.
2. Дятлов В. И., Коринец И. Ф. Автоматическая сварка в азоте аустенитных хромоникелевых сталей и сплавов // Автомат. сварка. – 1968. – № 9. – С. 25.
3. Каховский Н. И. Сварка высоколегированных сталей. – Киев: Техніка, 1975. – 376 с.
4. Нечаев В. А., Тимофеев М. М., Рубеник Ю. И. Влияние режима сварки на поглощение азота металлом при сварке незащищенной дугой высоколегированной аустенитной проволокой // Свароч. пр-во. – 1974. – № 4. – С. 24–26.
5. Лопухов Ю. И., Ивницкий Б. П., Сорокин Г. А. Газоэлектрическая наплавка арматуры в азотсодержащей защитной атмосфере // Энергомашиностроение. – 1989. – № 9. – С. 33–35.
6. Котвицкий А. Д. Сварка в среде защитных газов. – М.: Высш. шк., 1974. – 222 с.
7. Lettle K., Stapon G. How to simplify the choice of shielding gas. // Practical welding today (USA). – 2005. – 9, № 1 (January/February). – P. 22–25.
8. Herold H. et al. The use of nitrogen gas at welding of heat-resistant nickel alloys. – Australasian welding (Australia). – 2005. – Vol. 50, Second Quarter. – P. 40–47.
9. Готальский Ю. Я., Снисарь В. В. Проволоки для сварки разнородных сталей // Свароч. пр-во. – 1970. – № 2. – С. 42–44.
10. Потапов Н. Н. Окисление металлов при сварке плавлением. – М.: Машиностроение, 1985. – 216 с.
11. Готальский Ю. Н., Стретович А. Д. О механизме сцепления шлаковой корки с металлом шва // Свароч. пр-во. – 1976. – № 11. – С. 54–56.
12. Мусияченко В. Ф., Миходуй Л. И. Дуговая сварка высокопрочных легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 140 с.
13. Елагин В. П., Снисарь В. В., Липодаев В. Н. Механизированная сварка стали 15Х5М без подогрева и термообработки // Автомат. сварка. – 1995. – № 8. – С. 19–24.
14. Влияние легирования аустенитного шва азотом на развитие структурной неоднородности в зоне сплавления с перлитной сталью / В. В. Снисарь, В. Н. Липодаев, В. П. Елагин и др. // Автомат. сварка. – 1991. – № 2. – С. 10–14.
15. Підгаєцький В. В. Пори, включення та тріщини у зварних швах. – Київ: Техніка; 1970. – 236 с.
16. Грищенко Л. В., Киселев Я. Н., Петрыкин В. М. Снижение склонности к порообразованию в металле шва при сварке аустенитными электродами на хромоникелевой основе // Вопросы судостроения. Сер. Сварка. – 1987. – Вып. 26. – С. 20–24.
17. Елагин В. П., Снисарь В. В., Липодаев В. Н. Особенности дуговой сварки в азотсодержащих защитных газах аустенитными проволоками разнородных и перлитных сталей // Автомат. сварка. – 1993. – № 7. – С. 12–16.

Поступила в редакцию 14.05.2014