

Научная статья УДК 669.017:621.791.92 DOI: 10.36652/1813-1336-2023-19-9-416-420

Изучение влияния химического состава на параметры микротвердости наплавленного металла сплавом системы Fe—C—Si—Mn—Cr—W—V

Наталья Валерьевна Кибко^{1⊠}, канд. техн. наук, Андрей Владимирович Жуков², Николай Анатольевич Козырев³, д-р техн. наук, Роман Евгеньевич Крюков⁴, д-р техн. наук

^{1, 2, 4} Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия, krivicheva_nv@mail.ru[⊠]

3 ФГУП "ЦНИИчермет имени И.П. Бардина", Москва, Россия

Аннотация. Проведены исследования наплавленного слоя, полученного с использованием порошковых проволок системы Fe—C—Si—Mn—Cr—W—V с введением в их состав титана и углеродфторсодержащего материала пыли газоочистки алюминиевого производства, % мас.: 21...46 Al₂O₃; 18...27 F; 8...15 Na₂O; 0,4...6 K₂O; 0,7...2,3 CaO; 0,5...2,5 SiO₂; 2,1...3,3 Fe₂O₃; 12,5...30,2 С_{общ}; 0,07...0,9 MnO; 0,06...0,9 MgO; 0,09...0,19 S; 0,10...0,18 Р. Наплавленный слой получен с использованием электродуговой наплавки под флюсом сварочным трактором ASAW-1250 с использованием порошковой проволоки, изготовленной под флюсом из шлака производства силикомарганиа с химическим составом, % мас.: 0,50 FeO; 15,16 MnO; 29,13 CaO; 42,40 SiO₂; 6,80 Al₂O₃;1,39 MgO; 0,18 Na₂O; 0,59 K₂O; 0,28 S; 0,022 P; 0,004 ZnO; 0,024 C; 0,32 F; 0,17 TiO₂; 0,033 Cr₂O₃. Проведенные исследования позволили установить взаимосвязь химического состава наплавляемой порошковой проволоки со структурой и свойствами наплавленного металла. Установлено, что введение титана повышает значения твердости и микротвердости. Использование углеродфторсодержащей добавки приводит к микроструктурным изменениям, выраженным в получении структуры — феррит, перлит и бейнит, в отличие от структуры — мартенсит, δ-феррит и аустенит остаточный, а также к увеличению размера игл мартенсита в структуре наплавленного слоя. Микроструктурные изменения обусловлены введением углеродфторсодержащей добавки в состав порошковой проволоки и сопровождаются изменением микротвердости и твердости. С повышением содержания углеродфторсодержащей добавки в составе порошковой проволоки наблюдается увеличение микротвердости и твердости наплавленного металла.

Ключевые слова: микроструктура, порошковая проволока, твердость, микротвердость

Для цитирования: Изучение влияния химического состава на параметры микротвердости наплавленного металла сплавом системы Fe—C—Si—Mn—Cr—W—V / Н.В. Кибко, А.В. Жуков, Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19, № 9. С. 416—420. DOI: 10.36652/1813-1336-2023-19-9-416-420

Original article

Study of effect of chemical composition on microhardness parameters of deposited metal by Fe-C-Si-Mn-Cr-W-V alloy

Natalya V. Kibko^{1 \boxtimes}, Andrey V. Zhukov², Nikolay A. Kozyrev³, Roman E. Kryukov⁴ ^{1, 2, 4} Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, κ rivicheva_nv@mail.ru^{\boxtimes} ³ FSUE "TsNIIchermet named after I.P. Bardin", Moscow, Russia

Abstract. Studies of the deposited layer obtained using flux-cored wires of the Fe–C–Si–Mn–Cr–W–V system by introducing titanium and carbon-fluorine-containing material into their composition – gas cleaning dust of alumi-

num production, wt.%: 21...46 Al₂O₃; 18...27 F; 8...15 Na₂O; 0.4...6 K₂O; 0.7...2.3 CaO; 0.5...2.5 SiO₂; 2.1...3.3 Fe₂O₃; 12.5...30.2 C_{Total}; 0.07...0.9 MnO; 0.06...0.9 MgO; 0.09...0.19 S; 0.10...0.18 P. The deposited layer was obtained using submerged arc surfacing by the ASAW-1250 welding tractor using a fabricated flux-cored wire made from slag produced by silicomanganese with a chemical composition, mass. %: 0.50 FeO; 15.16 MnO; 29.13 CaO; 42.40 SiO₂; 6.80 Al₂O₃; 1.39 MgO; 0.18 Na₂O; 0.59 K₂O; 0.28 S; 0.022 P; 0.004 ZnO; 0.024 C; 0.32 F; 0.17 TiO₂; 0.033 Cr₂O₃. The studies carried out made it possible to establish the relationship between the chemical composition of the deposited flux-cored wire and the structure and properties of the deposited metal. It has been established that the introduction of titanium increases the values of hardness and microhardness. The use of a carbon-fluorine-containing additive leads to microstructural changes expressed in obtaining the structure — ferrite, perlite and bainite, in contrast to the structure — martensite, δ -ferrite and residual austenite, as well as to an increase in the size of martensite needles in the structure of the deposited layer. Microstructural changes are due to the introduction of a carbon fluorine-containing additive into the composition of flux-cored wire and are accompanied by a change in microhardness and hardness. With an increase in the content of the carbon-fluorine-containing additive in the composition of flux-cored wire, an increase in the microhardness and hardness of the deposited metal is observed.

Keywords: microstructure, flux-cored wire, hardness, microhardness

Введение

При проведении ремонта валков для горячей прокатки широко используется порошковая проволока марки ПП-Нп-35В9Х3СФ по ГОСТ 26101—84 [1—5]. В связи с этим большую актуальность приобретают вопросы изучения влияния химического состава и структуры наплавленного слоя на твердость и износостойкость прокатных валков, восстановленных с использованием порошковой проволоки на базе системы легирования Fe—C—Si—Mn—Cr—W—V. В настоящее время для снижения концентрации водорода и улучшения качества поверхности наплавляемого валика используются порошковые углеродфторсодержащие проволоки [6—12].

Цель работы — исследование параметров структуры и микротвердости наплавленного слоя, полученного при наплавке порошковой наплавочной проволокой системы Fe—C—Si—Mn—Cr—W—V при введении титана и углеродфторсодержащей добавки.

Материалы и методы исследования

В качестве шихтыдля проволоки ПП-Нп-35В9Х3СФ использовали порошок марки ПРВ-В20Х8Ф по ТУ 14-22-270-2017 ООО "ПОЛЕМА". В качестве добавки в шихту использовали порошок титана марки ТПП-1 ТУ 1791-449-05785388-2010 и в качестве заменителя углерода — углеродфторсодержащий материал (пыль газоочистки алюминиевого производства), состав, % мас.: 21...46 Al₂O₃; 18...27 F; 8...15 Na₂O; 0,4...6 K₂O; 0,7...2,3 CaO; 0,5...2,5 SiO₂; 2,1...3,3 Fe₂O₃; 12,5...30,2 C_{обш}; 0,07...0,9 MnO; 0,06...0,9 MgO; 0,09...0,19 S; 0,10...0,18 P.

Наплавку выполняли под флюсом, изготовленным из шлака производства силикомарганца с химическим составом, % мас.: 0,50 FeO; 15,16 MnO; 29,13 CaO; 42,40 SiO₂; 6,80 Al₂O₃; 1,39 MgO; 0,18 Na₂O; 0,59 K₂O; 0,28 S; 0,022 P; 0,004 ZnO; 0,024 C; 0,32 F; 0,17 TiO₂; 0,033 Cr₂O₃.

Порошкообразные материалы взвешивали на лабораторных аналитических весах AUX 120. Порошки смешивали в лабораторных вращательных смесителях в течение 30 мин. Порошковую проволоку изготавливали на лабораторном станке путем волочения через фильеру и намотку полученной порошковой проволоки на барабан. Наплавку электродуговых покрытий проводили сварочным трактором ASAW-1250 с использованием изготовленной порошковой проволоки на пластины из стали 09Г2С.

Химический состав наплавленных покрытий определяли рентгенофлюоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71. Образцы для проведения исследований микроструктуры, микротвердости и твердости были подготовлены по методике, включающей вырезку образцов на отрезном станке KKS 315L, шлифование на плоскошлифовальном станке 3Д725, полирование на полировальном станке FROMMIA 835 SE.

Металлографический анализ слоев, наплавленных порошковыми проволоками, проводили с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 с программным обеспечением SIAMS Photolab в светлом поле в диапазоне увеличений 100...1000 раз после травления поверхности образцов в 4%-ном растворе HNO₃ в этиловом спирте. Размер бывшего зерна аустенита определяли по ГОСТ 5639—82 при увеличении 100 раз, методом сравнения с эталонными шкалами. Характеристики мартенсита определяли согласно ГОСТ 8233—56.

Твердость и микротвердость наплавленного металла измеряли на тех же образцах, которые готовили для исследования микроструктуры. Микротвердость определяли по ГОСТ 9450-76 по методу Виккерса с использованием микротвердомера HVS-1000А, который позволяет автоматически проводить испытания с отображением твердости на дисплее и печатью данных на принтере. Точность измерения ±0,2 мкм. Индентором служила четырехгранная алмазная пирамидка, нагрузка на которую составляла 100 гс (0,981 Н). В ходе исследований шлифов наносили серию отпечатков в направлении от края до середины шлифа. Расстояние между отпечатками составляло до 200 мкм. При испытании измеряли длину диагонали отпечатка и подсчитывали численное значение микротвердости, по результатам измерений вычисляли среднее значение микротвердости.

Измерение твердости образцов осуществляли по ГОСТ 9012—59. Выполняли по методу Роквелла на твердомере модели ТК-14-250 в соответствии с требованиями ГОСТ 9013-59 путем вдавливания конического алмазного наконечника с углом при вершине 120°.

Определение химического состава, металлографический анализ, измерение твердости и микротвердости проводили на базе Центра коллективного пользования "Материаловедение" ФГБОУ ВО "Сибирский государственный индустриальный университет".

Результаты исследований и их обсуждение

Химический состав наплавленного слоя, полученного с применением опытной порошковой

проволоки представлен в табл. 1. В исследованиях при разработке новой порошковой проволоки в качестве сравнения за аналог принимали проволоку ПП-Нп-35В9Х3СФ, изготовленную с использованием графита марки ГЛ-1 (образец № 1). Далее изменяли концентрацию титана (образцы № 2—4) и углеродфторсодержащего материала без изменения концентрации титана (образцы № 5—9). Микроструктура наплавленного металла в зависимости от содержания титана и углеродфторсодержащей добавки в порошковой проволоке представлена на рис. 1 (см. обложку).

Металлографический анализ наплавленных порошковой проволокой слоев с содержанием титана показал, что их микроструктура равномерная, имеет в основном дендритное строение и представляет собой мелкоигольчатый мартенсит (балл 3, 4) с размером игл 2...6 мкм в бывших зернах аустенита, по границам которых располагаются тонкие прослойки δ -феррита, и небольшое количество аустенита остаточного в виде отдельных участков (образцы № 1—4, рис. 1, a—e).

В некоторых областях структуры наплавленного слоя, содержащего 0,17 % углерода, наблюдается бейнит, состоящий из больших ферритных областей с цементитными частицами (образец № 5, рис. 1, ∂). При уменьшении содержания углерода до 0,15 % наблюдаются микроструктурные изменения. Структура состоит из мартенсита, δ -феррита и небольшого количества остаточного аустенита в виде отдельных участков (образец № 7, рис. 1, *ж*). Однако мартенсит имеет более грубое строение. В структуре наплавленного слоя наблюдается среднеигольчатый и крупноигольчатый мартенсит (балл 6, 7) с размером игл 7...12 мкм. Таким образом, дополнительное введе-

Номер						Ma	ссовая	і доля	элеме	нтов, 9	6			o Nb Ti 04 0,01 0,031 04 0,01 0,035 03 0,02 0,028 04 0,02 0,032 02 0,01 0,006 01 0,01 0,007	Твердость	
образца	С	Si	Mn	Cr	Cu	Mo	V	W	Ni	Р	S	Al	Со	Nb	Ti	ĤRC
1	0,39	1,26	1,69	3,43	0,14	0,11	0,21	8,76	0,12	0,037	0,022	0,06	0,04	0,01	0,031	58,2
2	0,37	1,31	1,74	3,25	0,13	0,11	0,2	8,19	0,12	0,034	0,021	0,11	0,04	0,01	0,035	58,4
3	0,39	1,23	1,76	3,35	0,17	0,1	0,2	8,38	0,1	0,032	0,022	0,1	0,03	0,02	0,028	54,5
4	0,35	1,18	1,73	3,03	0,18	0,09	0,19	7,42	0,13	0,031	0,021	0,09	0,04	0,02	0,032	57,0
5	0,17	0,92	1,76	1,43	0,06	0,05	0,06	3,68	0,07	0,018	0,029	0,02	0,02	0,01	0,006	43,4
6	0,18	0,83	1,55	0,84	0,06	0,03	0,04	2,23	0,06	0,014	0,033	0,009	0,01	0,01	0,007	34,8
7	0,15	0,96	1,66	1,12	0,07	0,03	0,06	3,31	0,07	0,017	0,036	0,008	0,01	0,006	0,007	39,0
8	0,09	0,76	1,46	0,6	0,06	0,02	0,03	1,5	0,06	0,013	0,033	0,004	0,01	0,006	0,006	25,7
9	0,1	1,03	1,75	1,12	0,07	0,05	0,05	3,48	0,07	0,019	0,046	0,004	0,02	0,007	0,006	37,6

1. Химический состав наплавленных слоев

Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Том 19, № 9 Strengthening technologies and coatings. 2023. Vol. 19, no. 9

ние в состав проволоки титана обеспечивает получение более дисперсного мартенсита в структуре наплавленного металла, чем при использовании углеродфторсодержащей добавки.

Величина первичного зерна аустенита в структуре наплавленных порошковой проволокой слоев соответствует № 5. Получение структуры



Рис. 3. Влияние содержания титана *х* на микротвердость и твердость *у* наплавленного металла



Рис. 4. Влияние содержания углерода *х* на микротвердость и твердость *у* наплавленного металла

2. Твердость и микротвердость наплавленных слоев

Номер образца	Минимальное/ максимальное значение микро- твердости HV	Среднее зна- чение микро- твердости HV	Твердость HRC
1	654/670	663	58
2	610/619	611	58
3	562/569	564	54
4	566/583	576	57
5	268/275	271	43
6	283/297	288	35
7	528/537	533	39
8	355/367	361	26
9	324/335	329	38

с мелкоигольчатым мартенситом обеспечивает получение высокого уровня механических характеристик, особенно контактной выносливости и износостойкости.

Для каждого наплавленного слоя выполнено семь замеров микротвердости, полученные данные приведены на рис. 2 (см. обложку). Средние значения микротвердости и твердости приведены в табл. 2. Как видно из графиков, зависимости значений микротвердости и твердости от содержания титана и углерода (рис. 3, 4) в наплавленном слое существует взаимосвязь между этими параметрами.

Увеличение концентрации титана в наплавленном слое не приводит к значительным микроструктурным изменениям и при этом способствует повышению микротвердости и твердости наплавленного металла, по-видимому, за счет измельчения зерна (см. рис. 3).

Как и ожидалось, полученные результаты определения твердости показали, что наплавленный металл, в структуре которого присутствуют участки грубой бейнитной структуры, а также мартенсит имеют более высокие значения твердости, по сравнению с наплавленными слоями с феррито-перлитной структурой с участками бейнита (см. табл. 2).

Сравнительный анализ показал, что микролегирование порошковой проволоки титаном обеспечивает получение наиболее высоких значений микротвердости и твердости наплавленного металла по сравнению с введением в состав проволоки углеродфторсодержащей добавки. В данном случае значение твердости и микротвердости выше на 26...48 % и 48...54 % соответственно.

Выводы

1. Проведены металлографические и дюрометрические исследования наплавленного слоя, полученного с использованием порошковых проволок системы Fe—C—Si—Mn—Cr—W—V с микролегированием титаном и введением в их состав углеродфторсодержащего материала.

2. Показано, что микролегирование титаном порошковой проволоки обеспечивает получение в структуре наплавленного слоя мартенсита, δ-феррита и остаточного аустенита. Введение углеродфторсодержащей добавки в состав порошковой проволоки приводит к микроструктурным изменениям, выраженным в получении структуры: феррит, перлит и бейнит.

3. Установлено, что микроструктурные изменения исследуемых наплавленных слоев оказывают влияние на их твердость и микротвердость.

Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Том 19, № 9 Strengthening technologies and coatings. 2023. Vol. 19, no. 9 4. Показано, что получение более высоких значений микротвердости и твердости наплавленного слоя обеспечивается микролегированием порошковой проволоки титаном, по сравнению с введением в состав проволоки углеродфторсодержащей добавки.

5. В результате проведенных исследований были выявлены зависимости микротвердости и твердости наплавленного слоя от массовой доли углерода и титана, входящих в состав порошковых проволок системы Fe—C—Si—Mn—Cr—W—V. Полученные соотношения могут использоваться для прогнозирования микротвердости и твердости наплавленного слоя при изменении химического состава наплавленного металла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Технология** электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б.Е. Патона. Москва: Металлургия, 1974. 768 с.

2. Хасуи А. Наплавка и напыление. Москва: Машиностроение, 1995. 240 с.

3. Шехтер С.Я., Резницкий А.М. Наплавка металлов. Москва: Машиностроение, 1982. 71 с.

4. Наплавка деталей металлургического оборудования: справочник / под ред. С.Я. Шехтер, А.Я. Шварцер. Москва: Металлургия, 1981. 160 с.

5. **Фрумин И.И.** Наплавка // Сварка в СССР. Москва: Наука, 1981. Т. 1. С. 327—351.

сква: Наука, 1981. Т. 1. С. 327—351. 6. Крюков Р.Е., Козырев Н.А. Основы создания углеродсодержащих сварочных и наплавочных материалов // Юргинский технологический институт. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. 359 с. 7. Разработка новых порошковых проволок для наплавки. Порошковые проволоки с использованием углеродфторсодержащих материалов для ремонта прокатных валков / Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков, А.А. Усольцев [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. Вып. 1 (1417). С. 77—86.

8. **Повышение** качества наплавленного слоя прокатных валков за счет оптимизации состава порошковых проволок / Н.А. Козырев, Н.В. Кибко, А.А. Уманский [и др.] // Сварочное производство. 2017. № 7. С. 29—34.

9. Уманский А.А., Козырев Н.А., Титов Д.А. Экспериментальные исследования влияния состава порошковых проволок систем легирования С—Si—Mn— Cr—V—Mo и C—Si—Mn—Cr—W—V // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2016. № 4. С. 74—78.

10. Совершенствование состава порошковой проволоки системы Fe—C—Si—Mn—Cr—W—V для наплавки валков горячей прокатки введением в нее титана / Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, А.Р. Михно [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77, № 6. С. 698—703.

11. **Composition** of C-Si-Mn-Cr-W-V Powder Wire and Quality of Surfacing / N.A. Kozyrev, N.V. Kibko, A.A. Umanskii [et al.] // Steel in Translation, 2016. Vol. 46, no. 11. P. 781-787.

12. Совершенствование состава порошковых проволок системы С—Si—Mn—Cr—W—V с целью повышения качества и эксплуатационных характеристик наплавленного слоя / Н.А. Козырев, Н.В. Кибко, А.А. Уманский [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59, № 11. С. 806—813.

Статья поступила в редакцию 27.04.2023; одобрена после рецензирования 12.05.2023; принята к публикации 12.05.2023.