

DOI: 10.54826/19979258_2023_2_86
УДК 519.237:669.018.25

Изучение качества наплавленного металла системы Fe–C–Si–Mn–Cr–W–V

Роман Евгеньевич Крюков¹, д-р. техн. наук; **Николай Анатольевич Козырев²**, д-р техн. наук; **Наталья Валерьевна Кибко^{1,3}**, канд. техн. наук; **Александр Александрович Усольцев¹**, канд. техн. наук; **Андрей Владимирович Жуков¹**

¹ ФГБОУ ВО государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.

E-mail: Rek_nzrmk@mail.ru, a.us@rambler.ru, Svarka42@mail.ru

² ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», Москва, Россия. E-mail: n.kozyrev@chermet.net

³ ЕВРАЗ ЗСМК, Новокузнецк, Россия. E-mail: Krivicheva_nv@mail.ru

Аннотация. Изучено качество металла, полученного с использованием порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–W–V с присадками углеродфторсодержащего материала и титана. В качестве шихты использовали порошок для порошковой проволоки ПП-Нп-35В9ХЗСФ ООО «ПОЛЕМА». В шихту вводили порошок титана марки ТПП-1 ТУ 1791-449-05785388–2010 и углеродфторсодержащий материал (пыль газоочистки алюминиевого производства), состав, масс. %: 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_{общ}; 0,07–0,9 MnO; 0,06–0,9 MgO; 0,09–0,19 S; 0,10–0,18 P.

Наплавку производили под флюсом, изготовленным из шлака, полученного при производстве силикомарганца с химическим составом, масс. %: 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. После изготовления порошковой проволоки проводили многослойную наплавку металла, которую осуществляли сварочным трактором ASAW-1250 при режиме наплавки: $I = 500$ А, $U = 28$ В, $V_{св} = 15$ см/мин с использованием порошковой проволоки на пластины из стали Ст3.

Исследованы структуры неметаллических включений и некоторые физико-механические свойства (скорость износа и твердость) наплавленного слоя, полученного с использованием порошковых проволок системы Fe–C–Si–Mn–Cr–W–V с порошком титана и углеродфторсодержащего материала. В результате проведенных исследований, были выявлены зависимости твердости наплавленного слоя и скорости его износа от химического состава наплавленного слоя, полученного с использованием изготовленных порошковых проволок. Полученные соотношения могут использоваться для составления прогноза твердости наплавленного слоя и его износостойкости при изменении химического состава наплавленного металла.

Ключевые слова: порошковая проволока, электродуговое покрытие, твердость, скорость износа, химический состав

Study of the quality of deposited metal of the Fe–C–Si–Mn–Cr–W–V system

Roman E. Kryukov¹, **Nikolay A. Kozyrev²**, **Natal'ya V. Kibko^{1,3}**, **Aleksandr A. Usoltsev¹**, **Andrey V. Zhukov¹**

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

² FSUE «TsNIIchermet named after I.P. Bardin», Moscow, Russia

³ EVRAZ ZSMK, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The quality of the metal obtained using the flux-cored wire of the Fe–C–Si–Mn–Cr–W–V system with additives of carbon-fluorine-containing material and titanium was studied. Powder for flux-cored wire PP-NP-35V9X3SF of POLEMA LLC was used as a charge.

Titanium powder of the TPP-1 brand TU 1791-449-05785388–2010 and carbon-fluorine-containing material (gas cleaning dust of aluminum production) were introduced into the charge, composition, wt. %: 21–46 Al_2O_3 ; 18–27 F; 8–15 Na_2O ; 0,4–6 K_2O ; 0,7–2,3 CaO; 0,5–2,5 SiO_2 ; 2,1–3,3 Fe_2O_3 ; 12,5–30,2 Total; 0,07–0,9 MnO; 0,06–0,9 MgO; 0,09–0,19 S; 0,10–0,18 P.

Surfacing was carried out under a flux made from slag obtained during the production of silicomanganese with a chemical composition, wt. %: 0,50 FeO; 15,16 MnO; 29,13 CaO; 42,40 SiO_2 ; 6,80 Al_2O_3 ; 1,39 MgO; 0,18 Na_2O ; 0,59 K_2O ; 0,28 S; 0,022 P; 0,004 ZnO; 0,024 C; 0,32 F; 0,17 TiO_2 ; 0,033 Cr_2O_3 . After the manufacture of flux-cored wire, multilayer metal surfacing was carried out. Surfacing was carried out by an ASAW-1250 welding tractor in the surfacing mode: $I = 500$ A, $U = 28$ B, $V_{\text{sv}} = 15$ cm/min using flux-cored wire on plates made of St3 steel.

The structures, non-metallic inclusions and some physical and mechanical properties (wear rate and hardness) of the deposited layer obtained using flux-cored wires of the Fe–C–Si–Mn–Cr–W–V system with titanium powder and carbonfluorine-containing material are investigated. As a result of the research, the dependences of the hardness of the deposited layer and the rate of its wear on the chemical composition of the deposited layer obtained using the manufactured flux-cored wires were revealed. The obtained ratios can be used to predict the hardness of the deposited layer and its wear resistance when the chemical composition of the deposited metal changes.

Keywords: flux-cored wire, electric arc coating, hardness, wear rate, chemical composition

Введение. Для ремонтной наплавки прокатных валков, работающих в тяжелых условиях эксплуатации, чаще всего используются порошковые проволоки типа ПП-Нп-35В9Х3СФ (ГОСТ 26101–84) системы Fe–C–Si–Mn–Cr–W–V [1–5]. Однако при использовании таких проволок для наплавки отмечается ряд недостатков, и для обеспечения качественных ремонтных операций необходимо совершенствование состава шихты порошковых проволок и технологии их использования. В связи с этим проведение теоретических и экспериментальных исследований физической природы, процессов и механизмов упрочнения и формирования защитных свойств поверхностных слоев прокатных валков посредством электродуговых покрытий, наплавленных порошковыми проволоками, имеет большое научно-практическое значение [6–8]. На ряде разработанных проволок для снижения концентрации водорода и улучшения качества структуры наплаваемого валика практикуется введение углеродфторсодержащих материалов и различных легирующих элементов [9–16].

Цель работы – исследование структур, неметаллических включений и некоторых физико-механических свойств (скорости износа и твердости) 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.

Материалы и методы исследования. В качестве шихты использовали шихту для порошковой проволоки ПП-Нп-35В9Х3СФ ООО «ПОЛЕМА». В качестве добавки в шихту использовали порошок титана марки ТПП-1 ТУ 1791-449-05785388–2010 и в качестве заменителя углерода использовали углеродфторсодержащий материал (пыль газоочистки алюминиевого производства) состава, масс. %: 21–46 Al_2O_3 ; 18–27 F; 8–15 Na_2O ; 0,4–6 K_2O ; 0,7–2,3 CaO; 0,5–2,5 SiO_2 ; 2,1–3,3 Fe_2O_3 ; 12,5–30,2 $\text{C}_{\text{общ}}$; 0,07–0,9 MnO; 0,06–0,9 MgO; 0,09–0,19 S; 0,10–0,18 P.

Наплавку производили под флюсом, изготовленным из шлака производства силикомарганца с химическим составом, масс. %: 0,50 FeO; 15,16 MnO; 29,13 CaO; 42,40 SiO_2 ; 6,80 Al_2O_3 ; 1,39 MgO; 0,18 Na_2O ; 0,59 K_2O ; 0,28 S; 0,022 P; 0,004 ZnO; 0,024 C; 0,32 F; 0,17 TiO_2 ; 0,033 Cr_2O_3 .

Взвешивание порошкообразных материалов осуществляли на лабораторных аналитических весах AUX-120. Смешение порошков проводили на лабораторных вращательных смесителях в течение не менее 30 мин. Изготовление порошковой проволоки производили на лабораторном станке путем волочения ленты через фильеру и намотки полученной проволоки на барабан.

Наплавку электродуговых покрытий на пластины из стали 09Г2С проводили сварочным трактором ASAW-1250 с использованием изготовленной порошковой проволоки.

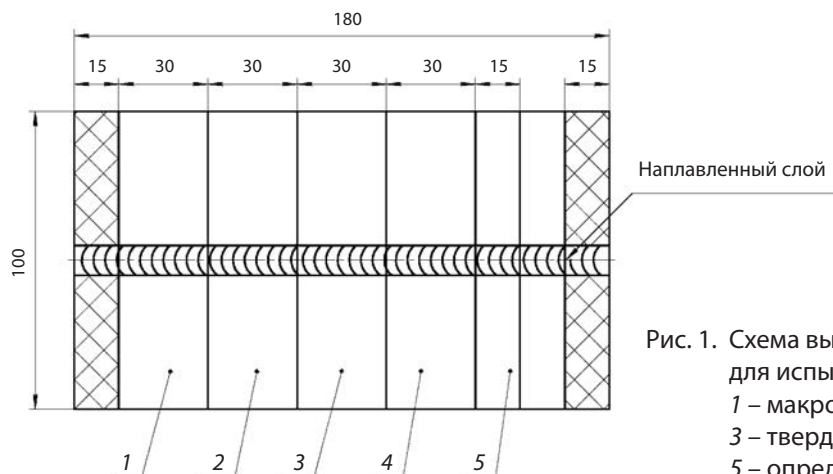


Рис. 1. Схема вырезки образцов для испытаний:
1 – макрошлифы; 2 – микрошлифы;
3 – твердость; 4 – износостойкость;
5 – определение содержания водорода

Режим наплавки рассчитывали и уточняли экспериментальным путем. Затем исследовали состав, строение и свойства поверхности металла наплавленного валика.

Химический состав наплавленных покрытий определяли рентгенфлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71. Образцы для исследования макро- и микроструктуры, твердости, износостойкости вырезали на отрезном станке KKS 315L, шлифовали на плоскошлифовальном станке ЗД725, полировали на полировальном станке FROMMIA 835 SE. Схема вырезки образцов для исследования представлена на рис. 1.

Степень загрязненности неметаллическими включениями наплавленных порошковыми проволоками слоев оценивали по ГОСТ 1778–70 при увеличении $\times 100$ методом сравнения с эталонными шкалами.

Для определения механических свойств из вырезанных образцов изготавливали макрошлифы размерами $20 \times 55 \times 14$ мм. 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 $\times 100$ – 1000 , после травления поверхности образцов в 4%-ном растворе HNO_3 в этиловом спирте. Величину бывшего зерна аустенита определяли

по ГОСТ 5639–82 при увеличении $\times 100$ методом сравнения с эталонными шкалами. Характеристики мартенсита определяли согласно ГОСТ 8233–56.

Измерение твердости образцов осуществляли по ГОСТ 9012–59 методом Роквелла на твердомере модели ТК-14-250 в соответствии с требованиями ГОСТ 9013–59. Измерение микротвердости поверхности наплавленного металла проводили на автоматическом микротвердомере Qness методом Виккерса. Испытания на износ проводили согласно ГОСТ 23.208–79 по схеме диск-колодка. Обработку результатов проводили по результатам взвешивания образцов до и после испытаний, определяя среднеарифметические значения потерь массы эталонного образца и образцов исследуемого материала. Скорость износа наплавленного слоя опытных образцов определяли путем испытаний на износ на машине 2070 СМТ-1 со следующими параметрами: диапазон измерения частоты вращения вала нижнего образца 75 – 750 мин^{-1} (диапазон А); диапазон измерения момента трения 1 – $10 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (диапазон I). Колодка-вал, которым проводилось истирание образцов, изготовлен из стали Р18.

Результаты и их обсуждение. Химический состав наплавленного слоя, полученного с применением опытной порошковой проволоки, твердость и скорость износа образцов представлены в табл. 1. В исследованиях при

Таблица 1

Химический состав наплавленных слоев

Номер образца	Содержание элементов, масс. %															Твердость, HRC	Скорость износа, об/мин
	C	Si	Mn	Cr	Cu	Mo	V	W	Ni	P	S	Al	Co	Nb	Ti		
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	2,26E-05
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	2,29E-05
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	2,91E-05
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	2,59E-05
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	9,75E-05
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	8,43E-05
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	2,24E-05
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	3,98E-05
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	8,68E-05

разработке новой порошковой проволоки в качестве сравнения за аналог принимали проволоку ПП-Нп-35В9ХЗСФ, изготовленную с использованием графита марки ГЛ-1 (образец 1), который был выбран в качестве образца сравнения. Далее осуществляли изменение концентрации титана (образцы 2–4) и углеродфторсодержащего материала без изменения концентрации титана (образцы 5–9). Причем концентрацию вольфрама несколько снижали с требуемых стандартом значений (образцы 1–4 с содержанием 8,76–7,42 %) до низких значений (образцы 5–9 с содержанием 3,68–1,55 %). Причем параллельно для исключения фактора влияния уровня загрязненности наплавленного слоя на износостойкость, проводилось изучение неметаллических включений (табл. 2, рис. 2).

Установлено, что при повышении содержания титана при одновременном изменении содержания остальных химических элементов в составе наплавленных слоев наблюда-

Таблица 2

Характеристика неметаллических включений наплавленных порошковой проволокой слоев

Номер образца	Загрязненность неметаллическими включениями, балл	
	оксиды точечные	силикаты недеформирующиеся
1	2а, 1а	2б, 2а, 4б
2	1а, 2а	2б, 2а, 3а
3	1а, 2а	2б, 2а, 3а, 4б
4	1а, 2а	2 б, 2а, 3а
5	2а, 1 а	2б, 3б, 4б
6	2а, 3а	3б, 4б
7	1а	2б, 1б
8	1а, 2а	2б, 3б
9	1а, 2а	2б, 1б

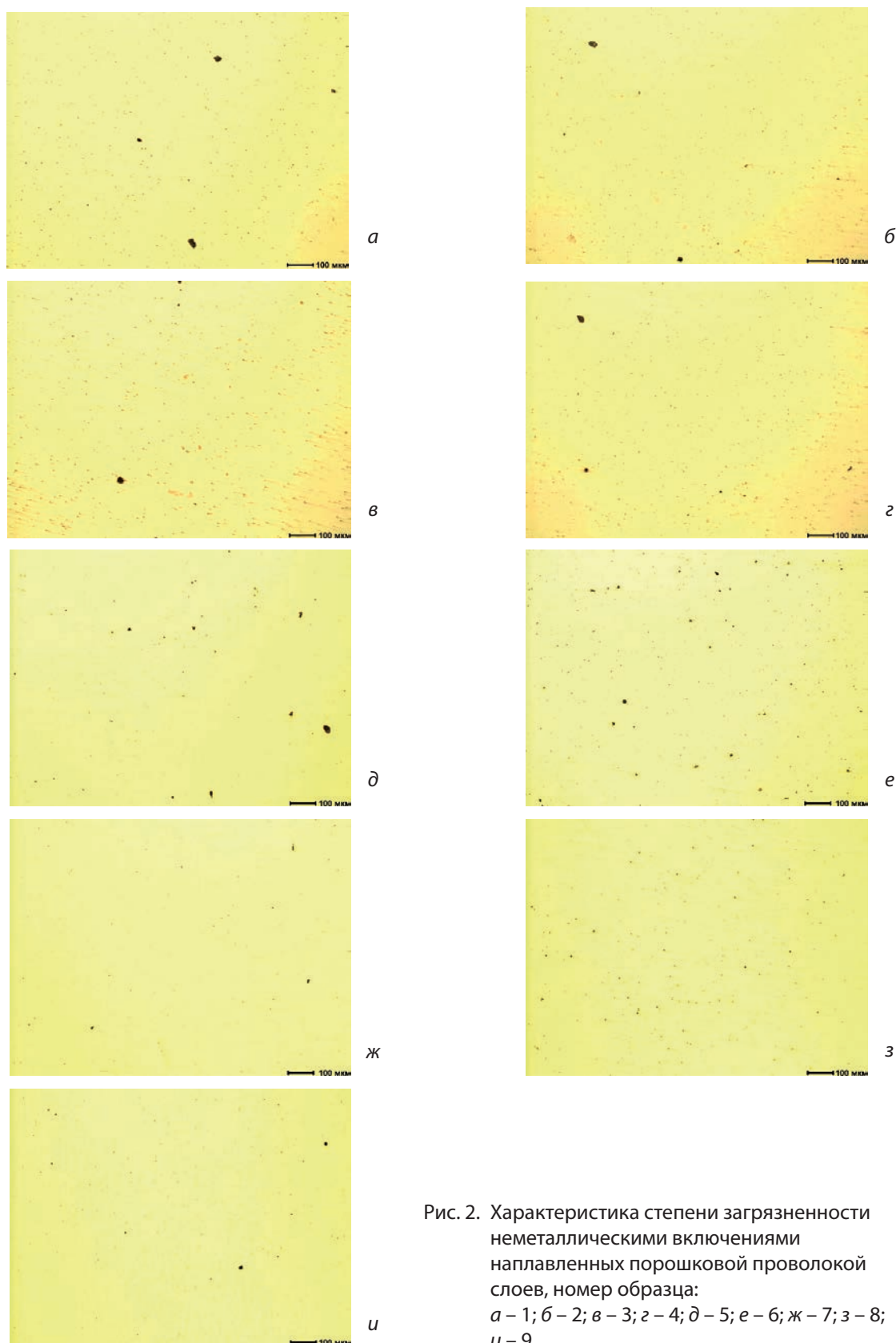
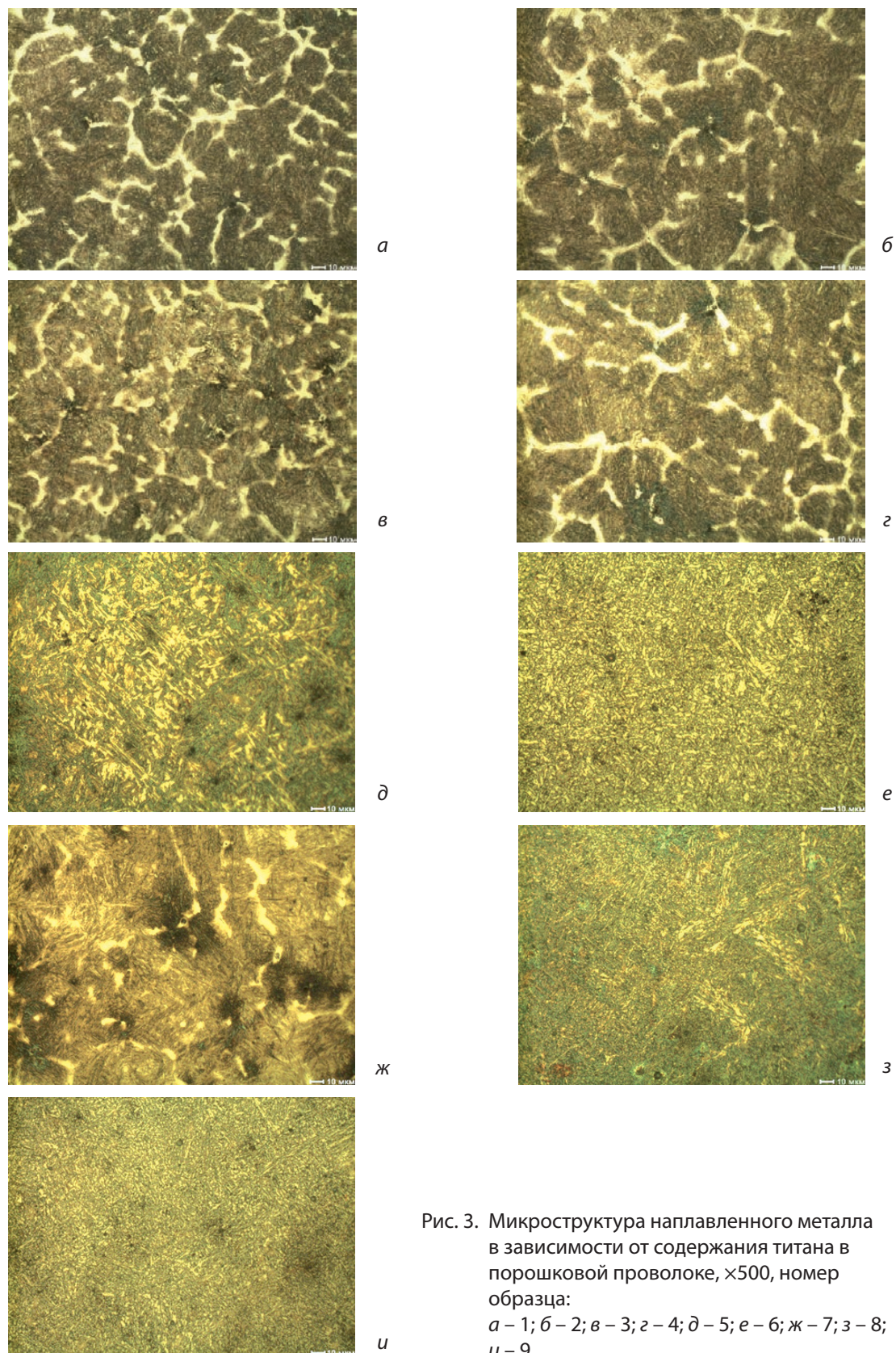


Рис. 2. Характеристика степени загрязненности неметаллическими включениями наплавленных порошковой проволокой слоев, номер образца:
а – 1; б – 2; в – 3; г – 4; д – 5; е – 6; ж – 7; з – 8;
и – 9



ется уменьшение размера оксидов точечных. На размер и количество силикатов недеформирующихся повышение содержания титана оказывает положительное влияние, обеспе-

чивая уменьшение степени загрязненности ими наплавленных слоев (образцы 2 и 4). При этом и при увеличении введения в состав проволоки углеродфторсодержащей добавки также наблюдается уменьшение уровня загрязненности оксидами точечными и силикатами недеформирующимися. По-видимому, размер и количество включений предопределены дополнительным раскислением получаемого при наплавке металла титаном и углеродом из шихты порошковой проволоки (рис. 3).

Микроструктура исследуемых наплавленных слоев с использованием титана равномерная, имеет в основном дендритное строение и представляет собой мелкоигльчатый 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. Величина первичного зерна аустенита в структуре наплавленных порошковой проволокой слоев соответствует номеру 5. Микроструктура наплавленного слоя проволокой с повышенным содержанием углеродфторсодержащей добавки без титана – среднеигльчатый и крупноигльчатый мартенсит (балл 6, 7) с размером игл 7–12 мкм в бывших зернах аустенита, по границам которых располагаются тонкие прослойки δ -феррита и небольшое количество аустенита остаточного в виде отдель-

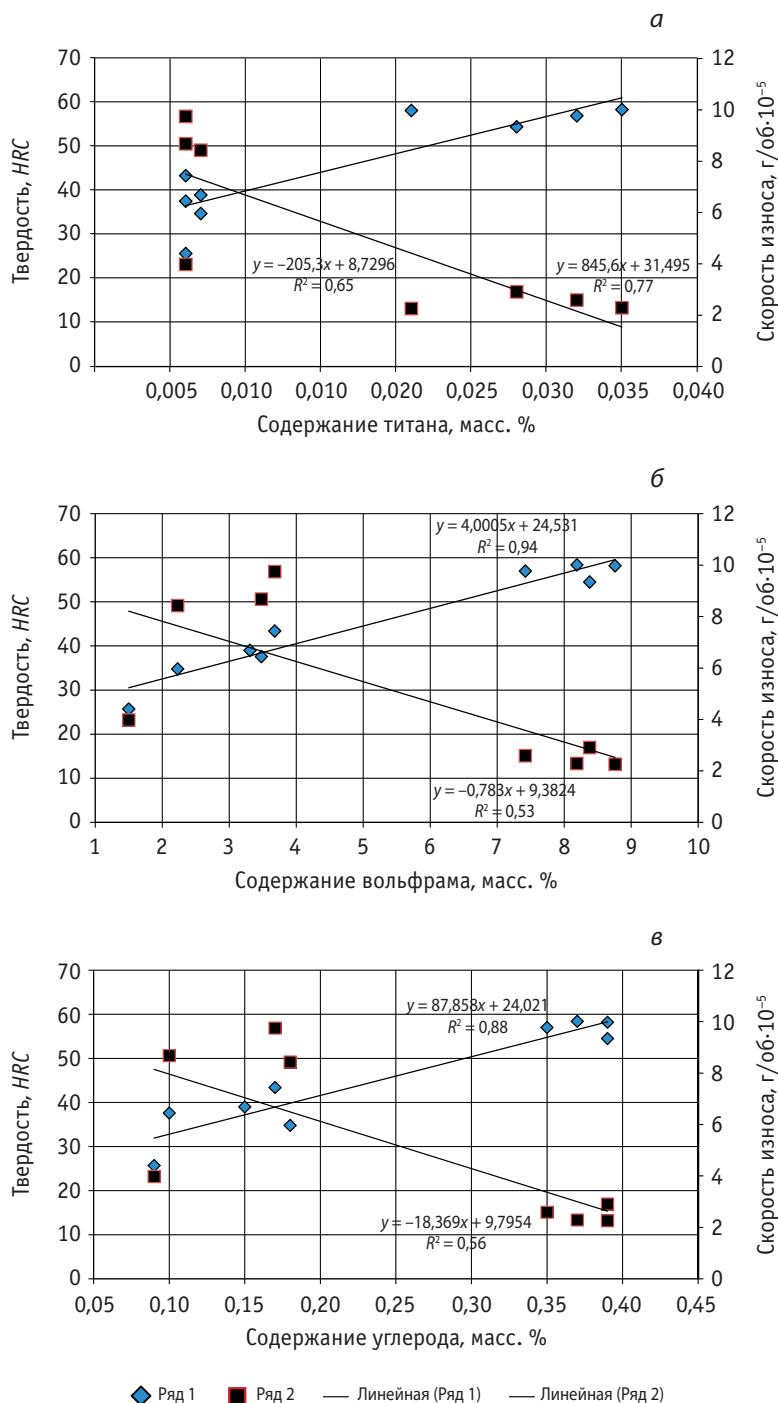


Рис. 4. Влияние титана (а), вольфрама (б) и углерода (в) на твердость наплавленного металла

ных участков. Величина первичного зерна аустенита в структуре данного наплавленного порошковой проволокой слоя соответствует номеру 5.

Таким образом, показано, что введение углеродфторсодержащей добавки приводит к микроструктурным изменениям, выраженным в получении структуры – феррит, перлит и бейнит взамен структуры – мартенсит, δ -феррит и аустенит остаточный. В результате введения в состав порошковой проволоки углеродфторсодержащей добавки наблюдается укрупнение игл мартенсита в структуре наплавленного слоя.

Зависимости твердости и скорости износа от различных элементов приведены на рис. 4. Как видно из рисунков, снижение концентрации вольфрама в наплавляемом слое ниже 7 % приводит как к снижению твердости, так и к повышению скорости износа, в связи с чем содержание вольфрама менее 7 % недопустимо. При этом повышение концентрации титана в наплавляемых образцах выше 0,025 % с указанным выше содержанием вольфрама может быть рекомендовано к использованию при наплавке рабочих поверхностей валков. Снижение концентрации углерода ниже 0,2 %, несмотря на хорошую свариваемость и полное отсутствие отбраковки по поверхностным дефектам, не может использоваться в промышленных условиях из-за значительного снижения твердости и увеличения скорости износа. Рекомендованная концентрация углерода – не менее 0,35 %. Данные рекомендации использованы при изготовлении порошковой проволоки ПП-Нп-35В9Х3СФ, внедрены в производство и защищены патентом РФ [17].

Выводы. 1. Разработана новая порошковая проволока системы Fe–C–Si–Mn–Cr–W–V с титаном и углеродфторсодержащим материалом.

2. В результате проведенных исследований выявлено влияние химического состава наплавленного порошковой проволокой слоя на его твердость и скорость износа. Показа-

но, что снижение концентрации вольфрама в наплавляемом слое ниже 7 %, углерода – менее 0,35 %, титана – ниже 0,025 % приводит к снижению твердости и повышению скорости износа

3. Определено, что введение углеродфторсодержащей добавки приводит к микроструктурным изменениям, выраженным в получении структуры – феррит, перлит и бейнит, в отличие от структуры – мартенсит, δ -феррит и аустенит остаточный. В результате введения в состав порошковой проволоки углеродфторсодержащей добавки наблюдается укрупнение игл мартенсита в структуре наплавленного слоя.

4. Проведенные исследования использованы при изготовлении порошковой проволоки ПП-Нп-35В9Х3СФ, внедрены в производство и защищены патентом РФ.

Список источников

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б.Е. Патона. М. : Металлургия, 1974. 768 с.
2. Хасуи А. Наплавка и напыление. М. : Машиностроение, 1995. 240 с.
3. Шехтер С.Я., Резницкий А.М. Наплавка металлов. М. : Машиностроение, 1982. 71 с.
4. Наплавка деталей металлургического оборудования : справ. / под ред. С.Я. Шехтер, А.Я. Шварцер. М. : Металлургия, 1981. 160 с.
5. Фрумин И.И. Наплавка. В кн. «Сварка в СССР». М. : Наука, 1981. Т. 1. С. 327–351.
6. Полухин В.П., Полухин П.И., Николаев В.А. Составной рабочий инструмент прокатных станов. М. : Металлургия, 1977. 88 с.
7. Будагьянц Н.А., Карсский В.Е. Литые прокатные валки. М. : Металлургия, 1983. 540 с.
8. Полухин В.П., Николаев В.А., Шульман П.Г. Надежность и долговечность валков холодной прокатки. М. : Металлургия, 1979. 503 с.
9. Крюков Р.Е., Козырев Н.А. Основы создания углеродсодержащих сварочных и наплавочных материалов: Монография. Томск : Изд. Томского политех. ун-та, 2019. 359 с.
10. Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Уманский А.А., Соколов П.Д. Разработка но-

- вых порошковых проволок для наплавки. Порошковые проволоки с использованием углеродфторсодержащих материалов для ремонта прокатных валков // Черная металлургия. Бюл. НТИЭИ. 2018. Вып. 1 (1417). С. 77–86.
11. Козырев Н.А., Кибко Н.В., Уманский А.А., Титов Д.А., Соколов П.Д. Повышение качества наплавленного слоя прокатных валков за счет оптимизации состава порошковых проволок // Сварочное производство. 2017. № 7. С. 29–34.
 12. Уманский А.А., Козырев Н.А., Титов Д.А. Экспериментальные исследования влияния состава порошковых проволок систем легирования C–Si–Mn–Cr–V–Mo и C–Si–Mn–Cr–W–V // Черная металлургия. Бюл. НТИЭИ. 2016. № 4. С. 74–78.
 13. Усольцев А.А., Михно А.Р., Козырев Н.А., Белов Д.Е., Шамрай В.Р. Исследование порошковых проволок системы Fe–C–Si–Mn–Cr–V–W с заменителем кремнефтористого натрия при наплавке под марганецсодержащими флюсами // Вестн. Сибирского гос. индустриального ун-та. 2021. № 1 (35). С. 3–11.
 14. Козырев Н.А., Усольцев А.А., Михно А.Р., Кибко Н.В., Белов Д.Е. Совершенствование состава порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–W–V для наплавки валков горячей прокатки введением в нее титана // Черная металлургия. Бюл. НТИЭИ. 2021. Т. 77, № 6. С. 698–703.
 15. Козырев Н.А., Кибко Н.В., Уманский А.А., Титов Д.А., Бащенко Л.П. Совершенствование состава порошковых проволок системы C–Si–Mn–Cr–W–V с целью повышения качества и эксплуатационных характеристик наплавленного слоя // Изв. вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59, № 11. С. 806–813.
 16. Kozыrev N.A., Kibko N.V., Umanskii A.A., Titov D.A., Bashchenko L.P. Composition of C–Si–Mn–Cr–W–V Powder Wire and Quality of Surfacing // Steel in Translation. 2016. Vol. 46, No. 11. P. 781–787.
 17. Пат. 2756550 РФ, МПК В23 К 35/368. Порошковая проволока / Юрьев А.Б., Козырев Н.А., Михно А.Р., Жуков А.В., Белов Д.Е. ; заявл. 12.02.2021, опубл. 01.10.2021. Бюл. № 28.

Статья поступила в редакцию 10.04.2023;
одобрена после рецензирования 29.05.2023;
принята к публикации 02.06.2023