МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
METALLURGY AND MATERIALS

Макиенко В. М., Соколов П. В., Перваков Д. Г., Романов И. О.
V. M. Makienko, P. V. Sokolov, D. G. Pervakov, I. O. Romanov

**РАЗРАБОТКА НАПЛАВОЧНОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ
ИЛЬМЕНИТО-КАРБОНАТНО-ФЛЮОРИТНОГО ТИПА**

**DEVELOPMENT ON THE SURFACING FLUX-CORED WIRE
OF ILMENITE-CARBONATE-FLUORITE TYPE**

Макиенко Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Подвижной состав железных дорог» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: mvm_tm@festu.khv.ru.

Mr. Viktor M. Makienko – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Rolling Stock Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: mvm_tm@festu.khv.ru.

Соколов Павел Валерьевич – ведущий инженер института дополнительного образования Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); Россия, 680021, г. Хабаровск, Серышева, 47; 8(4212) 61-70-32. E-mail: 617032@gmail.com.

Mr. Pavel V. Sokolov – Leading engineer of the Institute of additional education, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); Russia, 680021, Khabarovsk, 47 Seryshev Str.; 8(4212) 61-70-32. E-mail: 617032@gmail.com.

Перваков Дмитрий Геннадьевич – аспирант кафедры «Подвижной состав железных дорог» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); Россия, 680021, г. Хабаровск, Серышева, 47; 8(4212) 407-653.

Mr. Dmitry G. Pervakov – postgraduate student of Rolling Stock Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); Russia, 680021, Khabarovsk, 47 Seryshev Str.; 8(4212) 407-653.

Романов Игорь Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); Россия, 680021, г. Хабаровск, Серышева 47; 8(4212) 407-653.

Mr. Igor O. Romanov – PhD in Engineering, Associate professor, the Rolling Stock Department, Far Eastern State Transport university (Russia, Khabarovsk); Russia, 680021, Khabarovsk, 47 Seryshev Str.; 8(4212) 407-653.

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований по созданию порошковой проволоки ильменито-карбонатно-флюоритного типа на основе минерального сырья Дальневосточного региона. Получены диаграммы, позволяющие выбирать состав шихты в зависимости от требуемых свойств наплавленного металла.

Summary. The article presents the experimental research of the surfacing flux-cored wire of ilmenite-carbonate-fluorite type based on minerals of the Far Eastern region. The authors obtained diagrams that allow choosing the composition of the charge stock depending on the desired properties of the metal deposit.

Ключевые слова: порошковая проволока; шлаковая система; шихта; минеральное сырьё.

Key words: flux-cored wire; cindery system; charge stock; minerals.

УДК 621.791.011

Введение

В настоящее время при создании сварочных материалов используют минеральное сырьё в виде концентратов, ферросплавов или порошков различных металлов. В то же время на горно-обогачительных комбинатах и золотодобывающих предприятиях накапливаются большие запасы отходов рудного сырья, содержащего оксиды элементов, пригодных для получения высококачественных сварочно-наплавочных материалов.

Целью данной работы является создание порошковой проволоки для износостойкой наплавки на основе ранее разработанной шлаковой системы ильменито-карбонатно-флюоритного типа [1; 2] из концентратов и отходов горнорудного производства Дальнего Востока. Проволока создавалась для наплавки деталей подвижного состава, обеспечивающей высокую твёрдость (HB 450...500) [3].

Методика исследований

Исследования проводились по методике планирования экспериментов для многокомпонентных систем [4], по результатам которых строились математические модели и диаграммы влияния минерального сырья на механические и эксплуатационные свойства формируемых покрытий. Данная методика позволяет учитывать многофакторность системы и сократить объём экспериментальных исследований в 8...10 раз.

Результаты исследований и их обсуждение

Для проведения экспериментальных исследований была разработана схема оценки влияния входных параметров (основа шихты, графит, феррохром) на критерии работоспособности шлаковой системы (твёрдость, коэффициент износостойкости) при электродуговом процессе (см. рис. 1).

Рис. 1. Схема оценки влияния входных параметров на критерии работоспособности шлаковой системы при электродуговом процессе

Кроме того, было установлено, что на выбранные критерии данной системы существенное влияние оказывают сопутствующие параметры, значения которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сопутствующие параметры эксперимента

Параметры	Условное обозначение	Размерность	Значения параметров
Режим проковки шихты	Z1	°C, (час)	300...350
Коэффициент заполнения	Z2	масс. %	25...30
Сила тока	Z3	A	250...300
Напряжение на дуге	Z4	B	26...28
Вылет электрода	Z5	мм	20...40
Внешняя характеристика источника питания	E1	-	Жёсткая
Конструкция порошковой проволоки	E2	-	Трубчатая
Марка стали ленты	E3	-	08пс

Исследования по созданию наплавочной порошковой проволоки выполнялись на основе ранее разработанной шлаковой системы (см. табл. 2).

Таблица 2

Состав шлаковой системы (основа шихты)

Назначение	Компонент шихты	Содержание, масс. %	Основные элементы	Месторождение
Шлакообразующие	Гранодиорит	8	SiO ₂ , Al ₂ O ₃	Корфовское, Хабаровский край
	Флюорит	5	CaF ₂	Ярославское, Приморский край
Газообразующие/Стабилизирующие	Мрамор	37	CaCO ₃	Корфовское, Хабаровский край
Легирующие	Бадделеит	1	ZrO ₂	Алгаминское, Хабаровский край
	Датолитовый концентрат	4,5	B ₂ O ₃	Кавалеровское, Приморский край
Раскисляющие/Легирующие	Ферромарганец	10	марка ФМн-0,5	-
	Ферросилиций	7	марка ФС-45	-
Шлакообразующие/Стабилизирующие	Титаномагнетитовый шлик	27,5	FeTiO ₃	Фадеевский рудный узел, Приморский край

Данная шлаковая система обеспечивает высокое качество наплавленного металла и стабильное горение дуги, однако для получения требуемых свойств формируемых покрытий в шихту были добавлены графит и феррохром и проведены предварительные эксперименты в целях определения интервалов варьирования входных параметров. Результаты экспериментов приведены в табл. 3 – 5 и на рис. 2.

Таблица 3

Результаты исследований влияния феррохрома на твёрдость наплавленного металла

Основа шихты, %	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Феррохром, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Твёрдость НВ	143	143	207	241	255	260	265	269	265

Таблица 4

Результаты исследований влияния графита на твёрдость наплавленного металла

Основа шихты, %	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Графит, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Твёрдость НВ	153	210	302	415	445	512	443	415	417

Таблица 5

Результаты исследований совместного влияния графита с феррохромом (50/50) на твёрдость наплавленного металла

Основа шихты, %	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Графит + феррохром (50/50), %	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Твёрдость НВ	215	275	290	295	310	415	470	520	480

Рис. 2. Влияние соотношения массовых долей компонентов шихты на твёрдость наплавленного слоя

В результате предварительных экспериментов были установлены интервалы варьирования компонентов шихты порошковой проволоки (см. табл. 6).

Таблица 6

Интервалы варьирования компонентов шихты порошковой проволоки

Факторы	Условное обозначение	Нижний уровень (0)	Верхний уровень (100)
Основа шихты, масс.%	X_1	20	40
Графит, масс.%	X_2	30	50
Феррохром, масс.%	X_3	30	50

Далее на основе полученных данных была составлена матрица (см. табл. 7) и проведён плановый эксперимент.

Для установления функциональных зависимостей системы «состав покрытия – свойства наплавленного металла», нахождения её наиболее рациональных областей и принятия базового состава шихты порошковой проволоки использовался симплекс-решётчатый план 4-го порядка, уравнение которого имеет вид

$$\begin{aligned}
 y = & \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \gamma_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2) + \gamma_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3) + \\
 & + \gamma_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3) + \delta_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2)^2 + \delta_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3)^2 + \delta_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3)^2 + \\
 & + \beta_{1123} x_1^2 x_2 x_3 + \beta_{1223} x_1 x_2^2 x_3 + \beta_{1233} x_1 x_2 x_3^2.
 \end{aligned} \quad (1)$$

По результатам эксперимента на основании откликов системы рассчитывались коэффициенты полиномов для каждого выходного параметра (см. табл. 8).

Таблица 7

Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Входные параметры						Выходные параметры	
	Уровни варьирования факторов, %			Массовые доли компонентов, % от общей массы шихты			Твёрдость, НВ	Коэффициент износостойкости относительно стали 20ФЛ K_i
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3		
1	100	0	0	40	30	30	418	2,74
2	0	100	0	20	50	30	505	4,4
3	0	0	100	20	30	50	509	4,72
4	75	25	0	35	35	30	468	3,54
5	50	50	0	30	40	30	487	4,25
6	25	75	0	25	45	30	500	4,04
7	75	0	25	35	30	35	463	3,54
8	50	0	50	30	30	40	465	3,54
9	25	0	75	25	30	45	475	3,86
10	0	75	25	20	45	35	511	5,66
11	0	50	50	20	40	40	520	5
12	0	25	75	20	35	45	512	5,31
13	25	25	50	25	35	40	470	4,04
14	50	25	25	30	35	35	463	3,54
15	25	50	25	25	40	35	489	4,25

Таблица 8

Коэффициенты полиномов для выходных параметров

Коэффициент	Для твёрдости	Для износостойкости
β_1	43,7	2,74
β_2	51,3	4,4
β_3	51,7	4,72
β_{12}	11,2	2,72
β_{13}	2,8	-0,76
β_{23}	4,4	1,76
β_{1123}	-104,533	-34,4533
β_{1223}	44,8	-9,65333
β_{1233}	-108,267	1,493333
γ_{12}	5,866667	1,76
γ_{13}	17,06667	3,573333
γ_{23}	-4,26667	2,72
δ_{12}	5,333333	-6,18667
δ_{13}	5,866667	2,4
δ_{23}	1,6	12,69333

Полученные коэффициенты дали возможность в соответствии с выражением симплекс-решетчатого плана (1) установить связи входных и выходных параметров исследуемой системы «состав – свойства»:

– для твёрдости:

$$y_{ТВ} = 43,7x_1 + 51,3x_2 + 51,7x_3 + 11,2x_1x_2 + 2,8x_1x_3 + 4,4x_2x_3 + 5,866667x_1x_2(x_1 - x_2) + 17,066667x_1x_3(x_1 - x_3) - 4,266667x_2x_3(x_2 - x_3) + 5,33x_1x_2(x_1 - x_2)^2 + 5,866667x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + 1,6x_2x_3(x_2 - x_3)^2 - 104,533x_1^2x_2x_3 + 44,8x_1x_2^2x_3 - 108,267x_1x_2x_3^2;$$

– для коэффициента износостойкости:

$$y_{изн} = 2,74x_1 + 4,4x_2 + 4,72x_3 + 2,72x_1x_2 - 0,76x_1x_3 + 1,76x_2x_3 + 1,76x_1x_2(x_1 - x_2) + 3,573x_1x_3(x_1 - x_3) + 2,72x_2x_3(x_2 - x_3) - 6,186667x_1x_2(x_1 - x_2)^2 + 2,4x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + 12,693x_2x_3(x_2 - x_3)^2 - 34,4533x_1^2x_2x_3 - 9,653x_1x_2^2x_3 + 1,493x_1x_2x_3^2.$$

По полученным моделям строились диаграммы, позволяющие определять состав шихты в зависимости от заданных свойств наплавленного металла (см. рис. 3 – 5).

Рис. 3. Диаграмма влияния соотношения компонентов шихты на твердость (НВ) наплавленного металла

Из диаграммы на рис. 3 видно, что увеличение твердости происходит в результате уменьшения массовой доли основы шихты и увеличения массовых долей феррохрома и графита. Максимальная твердость достигается при содержании графита в пределах 43...50 %. В то же время при увеличении массовой доли феррохрома до 50 % и уменьшении массовой доли графита до 30 % твердость остаётся на прежнем высоком уровне несмотря на снижение содержания графита в шихте. Это обусловлено способностью хрома образовывать карбиды, тем самым увеличивая способность углерода переходить в наплавленный металл в виде хромистых карбидов.

Рис. 4. Диаграмма влияния соотношения компонентов шихты на коэффициент износостойкости (K_i) наплавленного слоя

Рис. 5. Совмещённая диаграмма. Коэффициент износостойкости (K_i) при различных величинах твёрдости (HВ)

В диапазоне содержания феррохрома в шихте 20...50 % коэффициент износостойкости не меняется и остаётся на максимально высоком уровне. Однако с увеличением содержания массовой доли феррохрома и уменьшением массовой доли графита коэффициент износостойкости K_i не уменьшается. Это связано с тем, что хром повышает сопротивление абразивному износу высокоуглеродистых сталей. В то же время в диапазоне содержания феррохрома между 39...41 % наблюдается незначительное снижение коэффициента износостойкости. Возможно, это обусловлено нелинейной зависимостью влияния соотношения хрома и углерода на абразивный износ наплавленного слоя. Максимальная износостойкость достигается при содержании основы шихты не более 21 %. При увеличении массовой доли основы шихты износостойкость уменьшается.

По совмещённой диаграмме (см. рис. 5) установлено, что максимальные показатели твёрдости и коэффициента износостойкости находятся в следующих пределах: основа шихты – 21 %; феррохром – 30...50 %; графит – 30...50 %.

На следующем этапе была изготовлена опытная порошковая проволока по выбранному составу шихты (основа – 22 %; графит – 38 %; феррохром – 40 %), выполнена наплавка и проведены исследования состава, структуры и свойств наплавленного металла. Результаты исследования приведены в табл. 9 – 10 и на рис. 6.

Таблица 9

Химический состав наплавленного металла, масс. %

Fe	Si	P	S	Cr	Mn	Ni	Cu	Mo	C
98,31	0,051	0,015	0,076	1,023	0,318	0,048	0,127	0,024	1,3...1,42

Таблица 10

Механические свойства наплавленного металла

Твёрдость	500 HB
Ударная вязкость	6,2 Дж/см ² (при температуре 20 °C)
Микротвёрдость	526...742HV

Рис. 6. Микроструктура наплавленного металла

По составу и структуре наплавленный металл (см. рис. 6) представляет собой легированный троостит с карбидной сеткой и отдельными дисперсными и изолированными включениями нитридов и карбонитридов, но без существенного влияния фазовых концентраторов и термических напряжений.

Разработанную порошковую проволоку можно использовать для восстановления деталей подвижного состава, требующих высокой твёрдости наплавленного слоя. Разработанной проволоке присвоена марка ПП-Нп-130ХГ.

Выводы

1. В результате экспериментальных исследований получены математические зависимости и построены диаграммы, на основе которых выбран состав шихты (основа – 22 %; графит – 38 %; феррохром – 40 %), обеспечивающий требуемые свойства наплавленного металла.
2. Создана порошковая проволока для наплавки деталей подвижного состава, обеспечивающая высокую твёрдость (450...500 НВ), ильменито-карбонатно-флюоритного типа из концентраторов и отходов горнорудного производства Дальнего Востока.
3. Разработанной порошковой проволоке присвоена марка ПП-Нп-130ХГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Получение шлаковой системы порошковой проволоки из минерального сырья дальневосточного региона / А. Д. Верхотуров, В. М. Макиенко, Д. В. Строителей, И. О. Романов // Химическая технология. – 2007. – № 10. – С. 433-442.
2. Макиенко, В. М. Исследование возможности использования минерального сырья и отходов горнорудного производства Дальневосточного региона России для создания сварочно-наплавочных материалов, используемых в строительстве и ремонте объектов железнодорожного транспорта / В. М. Макиенко, П. В. Соколов, Д. Г. Перваков // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2015. – № III-1(23). – С. 100-110.
3. Инструкция по сварке и наплавке при ремонте грузовых вагонов от 30.05.2008. – М.: ВНИИЖТ, 2008.
4. Зедгинидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгинидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.