МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
METALLURGY AND MATERIALS

Велесевич Е. В., Лихачёв Е. А.
E. V. Velesevich, E. A. Likhachev

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НАПЛАВОЧНЫМИ
ЭЛЕКТРОДАМИ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО
РЕГИОНА**

**RESEARCH OF COATING PROPERTIES, OBTAINED WITH WELDING ELECTRODES
FROM MINERAL RAW MATERIALS OF THE FAR EAST REGION**

Велесевич Евгений Владимирович – старший преподаватель, Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, г. Хабаровск); тел.: 8(924)107-57-57. E-mail: duomatic.spm@yandex.ru.

Velesevich Evgeny Vladimirovich – senior lecturer, Far East state transport university (Russia, Khabarovsk); tel.: 8(924)107-57-57. E-mail: duomatic.spm@yandex.ru.

Лихачёв Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент, Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, г. Хабаровск); тел.: 8(924)215-73-40. E-mail: likhachev_e@mail.ru.

Likhachev Evgeny Aleksandrovich – PhD in Engineering, Associate Professor, Far East state transport university (Russia, Khabarovsk); tel.: 8(924)215-73-40. E-mail: likhachev_e@mail.ru.

Аннотация. В статье рассматривается возможность применения метода симплекс-планирования при разработке состава электродного покрытия, пригодность которого доказана авторами экспериментальным путем. Установленные связи между входными и выходными параметрами могут иметь практическую значимость – при создании покрытия, позволяющего формировать наплавленные слои с заданными свойствами.

Summary. The article discusses the possibility of using the method of simplex planning while developing composition of the electrode coatings, which suitability is proven by the authors experimentally. The significance of the set connections between input and output parameters can be of practical value, i.e. when creating the coating that allows the deposited layer formation with desired properties.

Ключевые слова: наплавочные электроды, электродные материалы, минеральное сырье, симплекс-планирование.

Key words: welding electrodes, electrode materials, mineral raw materials, the simplex planning.

УДК 621.791.92:621.791.5.042.4:553.04:519.852.61

При изготовлении наплавочных электродов используют две группы материалов: металлические и неметаллические. К первой группе относятся собственно электродные (переплавляемые), которые являются основой швов и покрытий, и присадочные, выполняющие функции раскислителей и легирующих добавок. Вторая группа обеспечивает защиту расплавленного металла сварочной ванны от вредного воздействия атмосферы и совместно с первой группой формирует состав и свойства наплавляемого материала, при этом происходит окисление или легирование его. Существенное влияние на составы сплавов, получаемых при наплавке, оказывает основа изделия (подложка), на которую наносится материал электрода [1, 129].

При создании наплавочных материалов в качестве электродных нами использовалась сварочная проволока Св-08 А диаметром $d = 3$ мм (см. табл. 1), а для приготовления шихты обмазочного слоя применялись шеелитовый и бадделеитовый концентраты, содержащие оксиды легирующих элементов (см. табл. 2). Для регулирования вязкости шлаковой ванны, увеличения степени ее неравновесности, очищения наплавляемого металла от вредных примесей использовался плавленого шпатовый концентрат (флюорит), выпускаемый Ярославским горно-обогатительным комбинатом Приморского края (см. табл. 3). При этом доля флюорита в шихте сохранялась посто-

янной. Химический анализ концентратов выполнен на рентгеновском спектрометре «Спектроскан МАКС-GV» НПО «Спектрон» (Россия, Санкт-Петербург).

Таблица 1

Химический состав стали электродного сердечника

Марка проволоки	Состав, масс.%						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
						не более	
Св-08А	≤0,10	≤0,03	0,35...0,06	≤0,12	≤0,25	0,03	0,03

Таблица 2

Химический состав легирующих концентратов

Концентрат	Состав, масс.%														
	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	Na ₂ O	K ₂ O	WO ₃	ZrO ₂	B ₂ O ₃	Пр.
Шеелитовый	2,9	26,8	1,6	–	–	0,2	0,6	3,8	1,7	0,3	0,1	59,5	–	–	2,5
Бадделеитовый	30,2	4,1	7,4	0,3	1,4	0,1	0,4	1,7	–	0,1	–	–	49,7	–	4,6

Таблица 3

Химический состав плавленого шпата

Концентрат	Состав, масс.%					
	CaF ₂	SiO ₂	CaCO ₃	S	P	Пр.
Плавленый шпат	90	5,1	3,2	<0,1	<0,01	1,6

В качестве подложек для проведения экспериментальных исследований выбраны конструкционные стали (см. табл. 4), причем сталь 30ХГС рекомендована «Специализированной путевой машинной станцией № 317» г. Хабаровска, из которой изготавливаются футеровки щебнеочистительных машин СЧ-601. Анализ химического состава футеровок также проводился на рентгеновском спектрометре «Спектроскан МАКС-GV».

Таблица 4

Химический состав сталей, используемых в качестве подложек

Марка стали	Химический состав, масс.%							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P
							не более	
Ст.3	0,18...0,20	≤0,07	0,30...0,50	–	–	–	0,045	0,045
30ХГС	0,28...0,35	0,90...1,2	0,80...1,10	0,80...1,10	не более 0,3	не более 0,3	0,035	0,035

Шихта обмазок электродов изготавливались по схеме (см. рис. 1). Сыпучие и комковые компоненты после промывки, дробления и сушки измельчались и разделялись на необходимые фракции [2, 60].

Для разрушения органических флотоагентов порошок плавленого шпата прокаливался при температуре $T = 550...600\text{ }^{\circ}\text{C}$. После дозировки компонентов в соответствии с

рассчитанной рецептурой сухая смесь шихты в течение часа подвергалась перемешиванию в смесителе.

Рис. 1. Схема процесса изготовления наплавочных электродов

После перемешивания шихты с жидким стеклом масса наносилась на стержень по принципу экструзии (опрессовки) на электрообмазочном прессе ПЭ-6 усилием 160 т, предназначенном для изготовления металлических электродов. Подача прутков в обмазочную головку пресса осуществлялась прутковым питателем ППИ-800 ООО «Ротэкс». Готовые электроды просушивались, выстаиваясь при комнатной температуре, затем прокаливались в печи при $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Исследования качественных и количественных характеристик электродов и наплавленного металла основывались на кибернетической модели объекта исследования (см. рис. 2). Головной эксперимент, план которого приведен в [3, 193], позволил выявить зависимость системы «состав – свойства». Входные воздействия и значение откликов системы представлены в табл. 5.

Рис. 2. Модель объекта исследования

Входными параметрами модели были приняты углерод C (x_1), концентраты: шеелит (x_2) и бадделеит (x_3); а за выходные – твердость и износостойкость (относительно стали 40ХН, закаленной и отпущенной на твердость 41-43 HRC), которые являются одними из важных свойств элементов рабочих органов различных машин и оборудования. Твердость измерялась на автоматизированном стационарном твердомере по Роквеллу ТН-300, а износостойкость формируемых покрытий – на машине для испытания материалов на трение и износ ИИ 5018.

Таблица 5

План и результаты экспериментов

Номер опыта	План			Отклики						Обозначения откликов
	X ₁ Графит	X ₂ Шеелит	X ₃ Бадделейт	Твердость у _{НВ} , НВ			Коэффициент износостойкости у _{ки}			
				первое определение	второе определение	среднее значение	первое определение	второе определение	среднее значение	
1	1	0	0	506	518	512	0,921	1,079	1	Y ₁
2	0	1	0	129	133	131	0,754	0,76	0,757	Y ₂
3	0	0	1	128	134	131	0,669	0,325	0,497	Y ₃
4	1/3	2/3	0	493	495	494	1,598	1,868	1,733	Y ₁₂₂
5	1/3	0	2/3	539	571	555	1,071	0,879	0,975	Y ₁₃₃
6	0	1/3	2/3	417	413	415	0,936	0,966	0,951	Y ₂₃₃
7	2/3	1/3	0	416	414	415	0,962	0,94	0,951	Y ₁₁₂
8	2/3	0	1/3	94	98	96	0,1032	0,1428	0,123	Y ₁₁₃
9	0	2/3	1/3	146	140	143	0,59	0,78	0,685	Y ₂₂₃
10	1/3	1/3	1/3	450	438	444	1,06	1,022	1,041	Y ₁₂₃
11	11/20	2/5	1/20	539	551	545	1,063	1,2324	1,15	контрольная точка

Для системы с тремя входными факторами полином и формулы для определения коэффициентов имеют следующий вид:

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 + \gamma_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2) + \gamma_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3) + \gamma_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \beta_1 &= y_1, \beta_2 = y_2, \beta_3 = y_3, \\ \beta_{12} &= 9/4(y_{112} + y_{122} - y_1 - y_2), \\ \beta_{13} &= 9/4(y_{113} + y_{133} - y_1 - y_3), \\ \beta_{23} &= 9/4(y_{223} + y_{233} - y_2 - y_3), \\ \beta_{123} &= 27y_{123} - 27/4(y_{112} + y_{122} + y_{223} + y_{233} + y_{133} + y_{113}) + 9/2(y_1 + y_2 + y_3), \\ \gamma_{12} &= 9/4(3y_{112} - 3y_{122} - y_1 + y_2), \\ \gamma_{13} &= 9/4(3y_{113} - 3y_{133} - y_1 + y_3), \\ \gamma_{23} &= 9/4(3y_{223} - 3y_{233} - y_2 + y_3), \end{aligned} \quad (2)$$

где $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – содержание компонентов смеси ($\sum x_i = 1$); y_1, y_2, y_3, y_{123} и т.д. – значения откликов системы в узлах симплексной решётки, которые определяются опытным путем.

По формулам (2) были определены соответствующие коэффициенты полиномов, которые путем подстановки в выражение (1) принимают следующий вид:

– для твердости

$$y_{НВ} = 512x_1 + 131x_2 + 131x_3 + 913,5x_1x_2 + 420,75x_1x_3 + 51,75x_2x_3 + 1174,5x_1x_2x_3 + 445,5x_1x_2(x_1 - x_2) + 857,25x_1x_3(x_1 - x_3) + 317,25x_2x_3(x_2 - x_3); \quad (3)$$

– для коэффициента износостойкости

$$y_{ки} = x_1 + 0,757x_2 + 0,497x_3 + 2,14x_1x_2 + 0,911x_1x_3 - 1,064x_2x_3 + 1,861x_1x_2x_3 - 5,663x_1x_2(x_1 - x_2) - 1,132x_1x_3(x_1 - x_3) + 3,026x_2x_3(x_2 - x_3). \quad (4)$$

Адекватность полученных моделей была реализована двумя параллельными опытами в проверочной точке (см. табл. 5, опыт 11). Так как количество проведенных опытов $n < 30$, то справедливо использовать t-критерий Стьюдента [4, 221], который рассчитывался по формулам (5) и (7):

$$t_p = \frac{|y_o - y_p| \sqrt{r}}{\sigma\{y\} \sqrt{1 + \xi}}, \quad (5)$$

где y_p – предсказанное значение отклика в проверочной точке; y_o – экспериментальное значение отклика в проверочной точке; r – число параллельных опытов в проверочной точке; $\sigma\{y\}$ – среднеквадратическое отклонение опытных данных в проверочной точке; ξ – дисперсия предсказания значения отклика в проверочной точке, определяемая как

$$\xi = \sum C_i^2 + \sum C_{ij}^2 + \sum C_{ijk}^2, \quad (6)$$

где $C_i = 0,5x_i(3x_i - 1)(3x_i - 2)$, $C_{ij} = 4,5x_i x_j(3x_j - 1)$, $C_{ijk} = 4,5x_i x_j(3x_i - 1)$, $C_{ijk} = 27x_i x_j x_k$.

Результаты расчета коэффициентов приведены в табл. 6.

Таблица 6

Расчетные коэффициенты для определения ξ в контрольной точке

Коэффициент	Значение коэффициента	Коэффициент	Значение коэффициента
C_1	-0,1251	C_{223}	0,018
C_2	-0,064	C_{122}	0,198
C_3	0,0786	C_{133}	-0,0096
C_{112}	0,6435	C_{233}	-0,0765
C_{113}	0,0804	C_{123}	0,297

Величина ошибки предсказанных выходов уравнением полинома рассчитана по формуле

$$\Delta = \pm \frac{t_p \sigma\{y\}}{\sqrt{r}} \xi^{1/2}. \quad (7)$$

Итак, с учетом $r = 2$, $\xi = 0,58$, согласно (5), получено:

– для твердости $y_{нв}$: $\sigma\{y\} = 8$; $t_p = 0,32$;

– для коэффициента износостойкости $y_{ки}$: $\sigma\{y\} = 0,085$; $t_p = 0,58$.

Так как экспериментальные значения t-критерия Стьюдента не превосходят соответствующее табличное значение ($t_{0,05;1} = 12,71$ [4, 359]), то установленная модель третьего порядка адекватно описывает экспериментальные результаты, а следовательно, может быть использована для формирования контурных карт. Контурные карты для твердости $y_{нв}$ и коэффициента износостойкости $y_{ки}$ приведены на рис. 3 – 6.

При этом значения откликов рассчитывались с использованием программы MS Office Excel 2010, а построение контурных карт – программы STATISTICA 10 по сетке изменения входных параметров с шагом варьирования 0,05.

Рис. 3. Контурная карта для поверхности отклика твердости $u_{нв}$

Рис. 4. Контурная карта ошибок предсказанных значений твердости $u_{нв}$

Рис. 5. Контурная карта для поверхности отклика коэффициента износостойкости K_i

Рис. 6. Контурная карта ошибок предсказанных значений коэффициента износостойкости K_i

Полученные контурные карты могут быть применены не только для выбора компонентов состава электродной обмазки, но и для решения обратной задачи – предсказание твердости и коэффициента износостойкости для обмазки определенного состава и доверительных пределов [5, 66].

Выводы

Применение методов планирования эксперимента при разработке составов электродных покрытий доказало свою пригодность. Установленные взаимосвязи между входными и выходными параметрами могут быть использованы для создания состава электродного покрытия, которое позволит формировать наплавленные слои с заданными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основные аспекты транспортного минералогического материаловедения: моногр. / Э. Г. Бабенко [и др.]; под ред. д.т.н., проф. Ю. Г. Кабалдина. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – С. 129.
2. Методология создания сварочных материалов: моногр. / А. Д. Верхотуров [и др.]; под ред. чл.-корр. РАН Б. А. Воронова. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2009. – С. 60.
3. Зедгинидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгинидзе. – М.: Наука, 1976. – С. 193.
4. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – 4-е изд., доп. – М.: Высш. шк., 1972. – С. 221, 359.
5. Зедгинидзе, И. Г. Математическое планирование эксперимента для исследования и оптимизации свойств смесей / И. Г. Зедгинидзе. – Тбилиси: Мецниереба, 1971. – С. 66.