

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-117-129

***Новоточинов А.П., Владимиров А.А., Макаров А.В.**

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ МИСИС

*E-mail: alexander.nowotochinov@yandex.ru

РАЦИОНАЛЬНЫЙ СОСТАВ ТУГОПЛАВКИХ КОМПОНЕНТОВ НАПЛАВОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Аннотация. Представлено краткое описание условий работы деталей металлургического оборудования и возникающие на них дефекты. Представлена технология восстановительной и упрочняющей наплавки порошковой проволокой под слоем флюса. Представлено описание ключевых особенностей физико-механических свойств наплавленного слоя при механической обработке наплавленной поверхности. Установлено, что доминирующими тугоплавкими компонентами порошковой проволоки, влияющими на твердость и износостойкость наплавленного материала, являются вольфрам (W), карбид вольфрама (WC) и нитрид бора (BN).

В качестве подложки использовались цилиндрические образцы, диаметром 80 мм и высотой 20 мм из стали марки 30ХГСА. Наплавка осуществлялась на установке для автоматической наплавки под слоем флюса в научно-технической лаборатории восстановления и упрочнения СТИ НИТУ «МИСИС», проволоками марки АСМ 4430-SA под слоем сварочного флюса керамакс UF-02. После наплавки образцы подвергались термической обработке. Для проведения исследований свойств наплавленного материала, образцы были предварительно подготовлены. Резка образцов осуществлялась на многофункциональном отрезном станке. Трибологические испытания образцов производились на высокотемпературной машине трения.

Представлены результаты экспериментальных исследований скорости износа и твердости наплавленных материалов. Разработана регрессионная модель, описывающая влияние тугоплавких компонентов на износостойкость наплавленного материала. По результатам исследования оптимального соотношения химического состава тугоплавких компонентов порошковой проволоки на износостойкость наплавленного материала, сформулированы дальнейшие направления исследований оптимального соотношения тугоплавких компонентов и обеспечения обрабатываемости наплавленного слоя.

Ключевые слова: порошковая проволока, регрессионная модель, обрабатываемость, механическая обработка, нитрид бора, карбид вольфрама, вольфрам, электродуговая наплавка, скорость износа, твердость

Введение. Одним из способов повысить производительность металлургического производства является увеличение ресурса работы металлургического оборудования, а именно улучшение качества и снижение себестоимости выпускаемой продукции. Данный способ позволяет укреплять конкурентоспособность предприятия на внутреннем и международном рынках.

При восстановлении исходной геометрической формы рабочих поверхностей деталей металлургического оборудования ставится задача в упрочнении рабочих поверхностей деталей. Выполнение данных требований позволит увеличить межремонтный интервал восстановленных деталей и снизить экономические затраты, по сравнению с приобретением новых деталей.

Как известно, основные эксплуатационные затраты большинства предприятий идут на ремонт оборудования, а также на приобретения новых запасных частей и узлов машин [1–3].

К наиболее эффективным направлениям повышения стойкости металлургического оборудования является применение восстановительной

наплавки материалами с тугоплавкими компонентами. Одним из распространенных методов является электродуговая наплавка под слоем флюса.

Технология восстановительной и упрочняющей наплавки позволяет значительно снизить затраты на ремонт металлургического оборудования и уменьшить время простоя оборудования за счет увеличения межремонтного интервала.

В большей степени восстановлению подлежат детали, работающие в тяжелых условиях: повышенные механические нагрузки и термоциклические процессы. Суммарное воздействие данных нагрузок на рабочую поверхность детали приводит, как правило, к термоусталостному растрескиванию и последующему разрушению.

Для упрочнения рабочих поверхностей деталей, работающих в тяжелых условиях, необходимо исследовать влияние соотношения тугоплавких компонентов, которые позволят повысить износостойкость и уменьшить количество ремонтных простоев оборудования [4–8].

Целью данной работы является определение оптимального соотношения тугоплавких компонентов порошковой проволоки для повышения износостойкости рабочей поверхности деталей при работе в условиях адгезионного изнашивания и обеспечения удовлетворительной обрабатываемости наплавленной поверхности.

При увеличении прочностных свойств рабочей поверхности детали методом наплавки необходимо принимать во внимание необходимость последующей механической обработки резанием. Ввиду неоднородности структуры и геометрической волнистости наплавленного слоя, за счет формирования валиков наплавки, механическая обработка такой поверхности будет затруднена. Кроме указанных характеристик наплавленного слоя, также необходимо учесть высокую твердость и вязкость, возможное наличие в поверхности наплавки неметаллических включений, в виде закристаллизованного флюса, которые также будут оказывать значительное влияние на процесс механической обработки.

Таким образом, целесообразно сформулировать комплексную цель исследования, включающую в себя решение двух задач:

1) определение оптимального соотношения тугоплавких компонентов порошковой проволоки с целью повышения износостойкости рабочих поверхностей деталей;

2) определение оптимального соотношения износостойкости и обрабатываемости резанием наплавленного слоя.

Обрабатываемость металлов резанием является комплексным показателем, который включает в себя ряд факторов, оказывающих существенное влияние. Одним из таких факторов, основополагающим в данной работе, является износостойкость, которая напрямую связана с твердостью наплавленных слоев порошковой проволокой.

Таким образом, задачей данной работы является выявление и обобщение зависимости соотношения тугоплавких компонентов в порошковой проволоке с целью обеспечения максимальной износостойкости наплавленной поверхности детали.

Материалы и методы. Для изготовления экспериментальных составов порошковых проволок для наплавки образцов, в качестве базовой была выбрана проволока ASM 4430-SA (производство ООО «АСМ Группа») [8–12]. Состав металлической основы представлен в таблице 1.

В качестве модифицирующих тугоплавких компонентов использовали:

- порошок вольфрама W в чистом виде;
- порошок карбида вольфрама марки WC;

– порошок гексагонального нитрида бора марки A, BNг.

Составы экспериментальных порошковых проволок ASM 4430-SA приведены в таблице 2. Количество вводимого в состав проволоки карбида вольфрама основывалось на данных Такеда [2].

Экспериментальную шихту готовили в смесителе «Турбула» С2.0. Частота вращения барабана составляла 35-50 об/мин, время смешивания – 5 ч.

Изготовление порошковой проволоки осуществлялось по следующему технологическому процессу: на проволочном стане низкоуглеродистая стальная лента разматывается из бухты, формирующие ролики придавали ленте корытообразную форму, в которую из дозатора засыпали шихту. После засыпки ролики стана закрывали кромки ленты «внахлест» и плотно обжимали ее, препятствуя высыпанию шихты. На финишных операциях происходила окончательная калибровка проволоки (диаметр 2,4 мм) путем волочения через алмазную фильеру и последующей сушке в печи. Автоматическое регулирование скорости засыпки шихты и скорости движения ленты позволяло получить необходимый коэффициент заполнения проволоки порошком (~ 32 %).

Наплавка производилась на установке автоматической наплавки под слоем флюса модели УСН 60-550/1400 SAW с одинаковыми условиями всех образцов. Перед наплавкой образцы подвергались предварительному нагреву в печи до температуры 250°C и выдержкой 120 мин.

Наплавку опытных образцов производили в три слоя под керамическим флюсом керамакс марки UF-02 на цилиндрические образцы размером – Ø80×20 мм из стали 30ХГСА. Режим наплавки: сила тока $I = 250$ А, напряжение $U = 27$ В, скорость подачи электродной проволоки $V = 10$ м/час.

После наплавки порошковой проволоки, образцы подвергались термической обработке. Отпуск осуществлялся с нагревом образцов до 450°C и выдержкой 180 мин, скорость охлаждения $V_{\text{охл.}} < 50^\circ\text{C}/\text{час}$ до $T = 40^\circ\text{C}$, далее на открытом воздухе (комнатная температура).

Далее наплавленные образцы подвергали механической обработке на металлографическом станке metallographical sample cutting machine, с отрезным диском struers 40A30, размером 300×2×32 мм. Размер образцов для исследований твердости и трибологических испытаний составлял 20×20×5 мм.

Трибологические свойства образцов оценивали в соответствии с международными стандар-

тами ASTM G 99-959 и DIN 50324 на высокотемпературной машине трения «High-temperature Tribometer» («CSM Instruments», Швейцария) по схеме pin-on-disk (рис. 1) [13]. В качестве контртела применяли шарик из Al_2O_3 диаметром 6 мм. Линейная скорость скольжения образцов с покрытием выбрана равной 10 см/с, нагрузка – 5 Н. Температура эксперимента составляла 500°C. Зависимость коэффициента трения трущейся пары от длины пробега контртела (500 м) строилась на компьютере с помощью программного обеспечения «InstrumX».

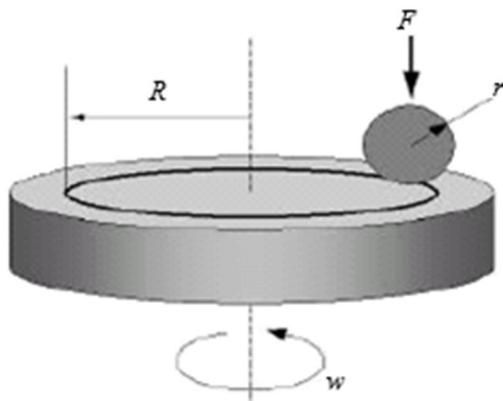


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

Профиль дорожки износа исследовали на оптическом профилометре «Veeco WYKONT NT 1100» (США).

Скорость износа рассчитывали по формуле:

$$W = s \times L / (H \times l), \quad (1)$$

где W – скорость износа, $mm^3 \cdot H^{-1} \cdot m^{-1}$;

L – длина окружности, мм;

s – площадь сечения износа канавки, mm^2 ;

H – нагрузка, Н;

l – путь трения, м.

Подготовку шлифов осуществляли в автоматическом режиме на полировальной машине

Struers RotoPol-21. Применяли шлифовальные бумаги Struers с различным размером карбида кремния (SiC) (#120 – #4000) и для полировки коллоидную суспензию на водной основе оксида кремния O.P.S. дисперсностью 0,05 мкм.

Твердость образцов с наплавленными слоями измеряли по методу Роквелла по ГОСТ 9013-59 на твердомере Метолаб 101 по методу РОКВЕЛЛА.

Основная часть. Для оптимизации химического состава тугоплавких компонентов порошковой проволоки необходимо было определить их оптимальное соотношение.

Коллективом авторов [13–15] основное внимание было уделено подбору химического состава тугоплавких компонентов наплаваемого материала, обеспечивающих высокие износостойкость и твердость. За основу была выбрана порошковая проволока ASM 4430-SA. Химический состав металлической оболочки представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав металлической оболочки в %

Fe	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
Осн.	0,3	1,3	0,6	14,0	0,4	1,2	0,2

За счет изменения модифицирующих тугоплавких компонентов вольфрама (W), карбида вольфрама (WC) и гексагонального нитрида бора (BNr), был разработан ряд порошковой проволоки с разным соотношением тугоплавких компонентов [16–20].

В результате исследования наплавленных экспериментальными проволоками образцов, были получены следующие показатели скорости износа и твердости, представленные в таблице 2.

Таблица 2

Химический состав шихты и свойства наплавленных материалов

№	Проволока	Химический состав шихты %			Скорость износа, W, $10^{-6} mm^3 \cdot H^{-1} \cdot m^{-1}$	Твердость, HRC*
		W	WC	BNr		
1	АСМ 7	–	3	–	6,84	$35,9 \pm 3,5$
2	АСМ 8	–	6	0,1	6,16	$45,1 \pm 3,7$
3	АСМ 9	–	10	0,2	2,16	$45,9 \pm 1,7$
4	АСМ 10	–	6	0,3	2,66	$46,6 \pm 2,1$
5	АСМ 11	–	10	0,4	2,72	$51,5 \pm 2,3$
6	АСМ 12	4,5	–	0,5	3,55	$51,2 \pm 2,3$
7	АСМ 13	7,0	–	1,0	1,05	$49,8 \pm 1,8$
8	АСМ 14	5,0	4,3	0,3	1,88	$52,0 \pm 1,3$

* Показание твердомера 60,0 HRC на контрольном сертифицированном образце 61,1 HRC

Анализ представленных результатов исследования наплавленного материала очевидно отсутствия пропорционального изменения скорости износа и твердости в зависимости от соотношения количества тугоплавких компонентов не

показал. Например, при наличии в шихте проволоки АСМ 7 только карбида вольфрама (WC) в количестве 3 % скорость износа высокая, при этом низкая твердость. Тоже самое прослеживается для проволоки АСМ 8, где содержание кар-

бида вольфрама (WC) 6 % и гексагонального нитрида бора (BNr) 0,1 %, при этом твердость увеличивается до значения 45,1 HRC.

При одновременном добавлении вольфрама (W), карбида вольфрама (WC) и гексагонального нитрида бора (BNr) в разных процентных соотношениях очевидно, что прочностные результаты повысились, но не наблюдается прямой зависимости.

Исходя из неудовлетворительных значений скорости износа и твердости наплавленного материала проволоки АСМ7 и АСМ8 для расчета регрессионной модели не были приняты во внимание.

Таким образом, на основе результатов исследований наплавленных материалов построение регрессионной модели осуществлялась методом

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_{12}X_1X_2 + A_{11}X_1^2 + A_{22}X_2^2, \tag{2}$$

где $A_0, A_1, A_2, A_{12}, A_{11}, A_{22}$ – постоянные коэффициенты.

полинома по значениям химического состава шихты проволок АСМ 9-АСМ 14.

Из результатов анализа регрессионной модели, полученной методом полинома, учитывающей как три одиночных фактора, соответствующих каждому элементу шихты, так и их взаимодействие, была установлена неадекватность. Следовательно, для разработки регрессионной модели целесообразно было ее построение по двум факторам и их взаимодействию:

- X_1 – процентное содержание W+WC %;
- X_2 – процентное содержание BNr %.

В качестве функции отклика Y была принята скорость износа образцов $W, 10^{-6} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Поиск решения производился в виде полинома второй степени:

По таблице исходных данных (табл. 3) было составлено 6 уравнений (3).

Таблица 3

Исходные данные для построение регрессионной модели

№ п/п	A_0	A_1	A_2	A_{12}	A_{11}	A_{22}	$Y_{\text{эсп.}}$
1	1	10	0,2	2	100	0,04	2,16
2	1	6	0,3	1,8	36	0,09	2,66
3	1	10	0,4	4	100	0,16	2,72
4	1	4,5	0,5	2,25	20,25	0,25	3,55
5	1	7	1	7	49	1	1,05
6	1	9,3	0,3	2,79	86,49	0,09	1,88

Уравнения для построения регрессионной модели:

- 1) $A_0 + 10A_1 + 0,2A_2 + 2A_{12} + 100A_{11} + 0,04A_{22} = 2,16,$
- 2) $A_0 + 6A_1 + 0,3A_2 + 1,8A_{12} + 36A_{11} + 0,09A_{22} = 2,66,$
- 3) $A_0 + 10A_1 + 0,4A_2 + 4A_{12} + 100A_{11} + 0,16A_{22} = 2,72,$
- 4) $A_0 + 4,5A_1 + 0,5A_2 + 2,25A_{12} + 20,25A_{11} + 0,25A_{22} = 3,55,$
- 5) $A_0 + 7A_1 + A_2 + 7A_{12} + 49A_{11} + A_{22} = 1,05,$
- 6) $A_0 + 9,3A_1 + 0,3A_2 + 2,79A_{12} + 86,49A_{11} + 0,09A_{22} = 1,86.$

Запись уравнений в виде матрицы $Y=X*A$:

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 10 & 0,2 & 2 & 100 & 0,04 \\ 1 & 6 & 0,3 & 1,8 & 36 & 0,09 \\ 1 & 10 & 0,4 & 4 & 100 & 0,16 \\ 1 & 4,5 & 0,5 & 2,25 & 20,25 & 0,25 \\ 1 & 7 & 1 & 7 & 49 & 1 \\ 1 & 9,3 & 0,3 & 79 & 86,49 & 0,09 \end{pmatrix}; Y = \begin{pmatrix} 2,16 \\ 2,66 \\ 2,72 \\ 3,55 \\ 1,05 \\ 1,86 \end{pmatrix}.$$

Решение данной матрицы производилось методом Гаусса, в результате решения были получены следующие постоянные коэффициенты (табл. 4):

Таблица 4

Постоянные коэффициенты

A_0	A_1	A_2	A_1A_2	A_{11}	A_{22}
22,72	-4,622	-15,7	1,742	0,253	1,848

Модель с учетом всех коэффициентов приняла следующий вид:

$$Y = 22,72 - 4,62X_1 - 15,731X_2 + 1,742X_1X_2 + 0,253X_1^2 + 1,848X_2^2. \quad (4)$$

По уравнению модели (3) были произведены вычисления расчетных функций отклика $Y_{расч}$ и сведены в таблицу 5.

Таблица 5

Проверка адекватности модели

№ п/п	$Y_{эксп}$	$Y_{расч}$	ΔY	$S_{ад}^2$
1	2,16	2,212	0,052	0,0028
2	2,66	2,679	0,019	0,0019
3	2,72	2,771	0,051	0,0007
4	3,55	3,560	0,010	0,0007
5	1,05	1,074	0,024	0,0013
6	1,88	1,925	0,045	0,0007

Проверка адекватности модели показала, что модель адекватна.

Величина доверительного интервала при коэффициенте Стьюдента $t = 2,57$, для уровня значимости 5 %, составила:

$$Y = 22,72 - 4,62X_1 - 15,731X_2 + 1,742X_1X_2 + 0,253X_1^2 + 1,848X_2^2. \quad (6)$$

Оптимизация модели движением по градиенту по методу Бокса-Уилсона, предполагает установление величины шагов, которые зависят от величины коэффициента и интервала варьирования для каждого фактора [21-22].

Движение по градиенту осуществляли в пределах значений X_1 (от 4 до 8,5, с шагом 0,5) и значений X_2 (от 0,1 до 1,4, с шагом 0,1).

$$b_i = \pm t \cdot S_{bi} = \pm 0,00131. \quad (5)$$

Следовательно, все коэффициенты являлись значимыми. Таким образом, уравнение модели (3) приняло следующий вид.

На первом этапе за const брали X_1 (процентное содержание W+WC, от 4 до 8), в каждом шаге изменяя X_2 (процентное содержание BNг, от 0,1 до 1,4) при этом были выявлены оптимальные соотношения X_1 и X_2 , при которых функция отклика достигала минимальных значений, соответствующих низкой скорости износа.

Таблица 6

Значения величины функции отклика при движении по градиенту изменением факторов X_1 и X_2 , шаг 1-3

№п/п	Шаг 1: $X_1=4; X_2=0,9-1,3$			Шаг 2: $X_1=4,5; X_2=0,9-1,2$			Шаг 3: $X_1=5; X_2=0,9-1,2$		
	X_1	X_2	$Y_{расч}$	X_1	X_2	$Y_{расч}$	X_1	X_2	$Y_{расч}$
9	4	0,9	1,89	4,5	0,9	1,438	5	0,9	1,113
10	4	1	1,365	4,5	1	1	5	1	0,762
11	4	1,1	0,877	4,5	1,1	0,599	5	1,1	0,448
12	4	1,2	0,426	4,5	1,2	0,235	5	1,2	0,171
13	4	1,3	0,011						

Таблица 7

Значения величины функции отклика при движении по градиенту изменением факторов X_1 и X_2 , шаг 4-6

№п/п	Шаг 4: $X_1=5,5; X_2=0,1-1,4$			Шаг 5: $X_1=6; X_2=0,1-1,4$			Шаг 6: $X_1=6,5; X_2=0,1-1,4$		
	X_1	X_2	$Y_{расч}$	X_1	X_2	$Y_{расч}$	X_1	X_2	$Y_{расч}$
6				6	0,6	1,594	6,5	0,6	1,387
7	5,5	0,7	1,553	6	0,7	1,306	6,5	0,7	1,186
8	5,5	0,8	1,215	6	0,8	1,056	6,5	0,8	1,023
9	5,5	0,9	0,914	6	0,9	0,842	6,5	0,9	0,896
10	5,5	1	0,65	6	1	0,665	6,5	1	0,806
11	5,5	1,1	0,423	6	1,1	0,525	6,5	1,1	0,754
12	5,5	1,2	0,233	6	1,2	0,422	6,5	1,2	0,738
13	5,5	1,3	0,08	6	1,3	0,356	6,5	1,3	0,759
14				6	1,4	0,327	6,5	1,4	0,817

Таблица 8

Значения величины функции отклика при движении по градиенту изменением факторов X_1 и X_2 , шаг 7-8

№п/п	Шаг 7: $X_1=7$; $X_2=0,5-1,4$			Шаг 8: $X_1=7,5$; $X_2=0,5-1,4$		
	X_1	X_2	$Y_{расч}$	X_1	X_2	$Y_{расч}$
5	7	0,5	1,457	7,5	0,5	1,415
6	7	0,6	1,306	7,5	0,6	1,352
7	7	0,7	1,193	7,5	0,7	1,326
8	7	0,8	1,116	7,5	0,8	1,336
9	7	0,9	1,077	7,5	0,9	1,384
10	7	1	1,074	7,5	1	1,468
11	7	1,1	1,108			
12	7	1,2	1,18			
13	7	1,3	1,288			
14	7	1,4	1,433			

Из анализа результатов расчетов по регрессионной модели очевидно, что для каждого значения фактора X_1 существует определенный диапазон значений фактора X_2 , который обеспечивал низкую скорость износа в диапазоне от 0,011 до 1,89.

Движение по градиенту для проволоки с содержанием $W+WC > 8\%$, по результатам расчета регрессионной модели для дальнейших исследований было нецелесообразным, ввиду увеличения скорости износа. Таким образом, по расчетам регрессионной модели был определен диапазон

оптимальных значений процентного содержания $W+WC$ от 4 % до 7,5 %.

Для определения характера изменения скорости износа в зависимости от соотношения тугоплавких компонентов шихты были построены графики при $X_2 = const$, для значений: 0,5; 1,0; 1,4 рис. 2–5.

На втором этапе движением по градиенту осуществляли выборочное фиксирование положения процентного содержания как $W+WC$, так и $BN\Gamma$, лучшего соотношения на основании первого этапа.

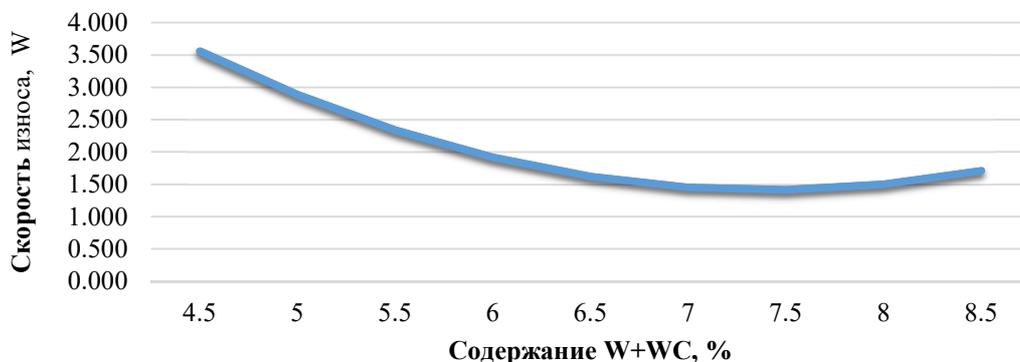


Рис. 2. График зависимости скорости износа от $W+WC$, при $BN\Gamma=0,5$

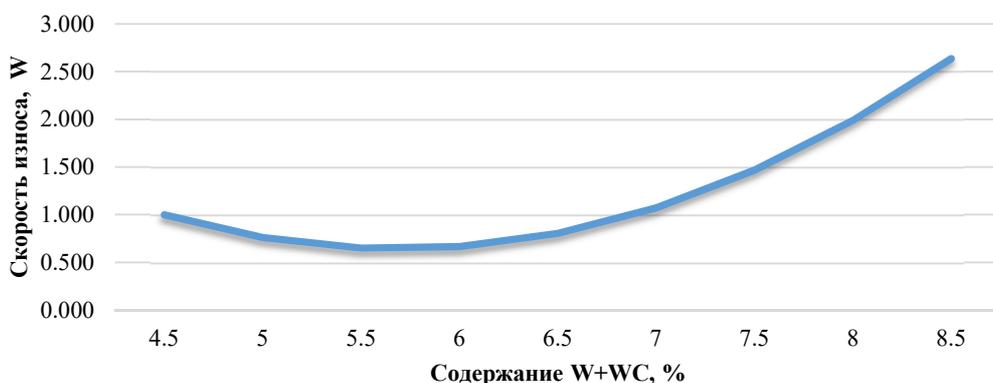


Рис. 3. График зависимости скорости износа от $W+WC$, при $BN\Gamma=1,0$

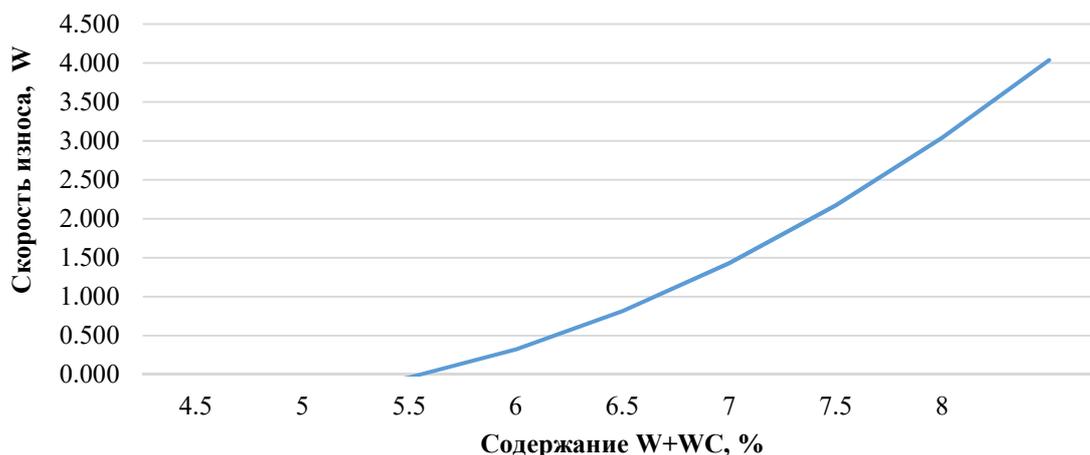


Рис. 4. График зависимости скорости износа от W+WC, при $B\Gamma=1,4$

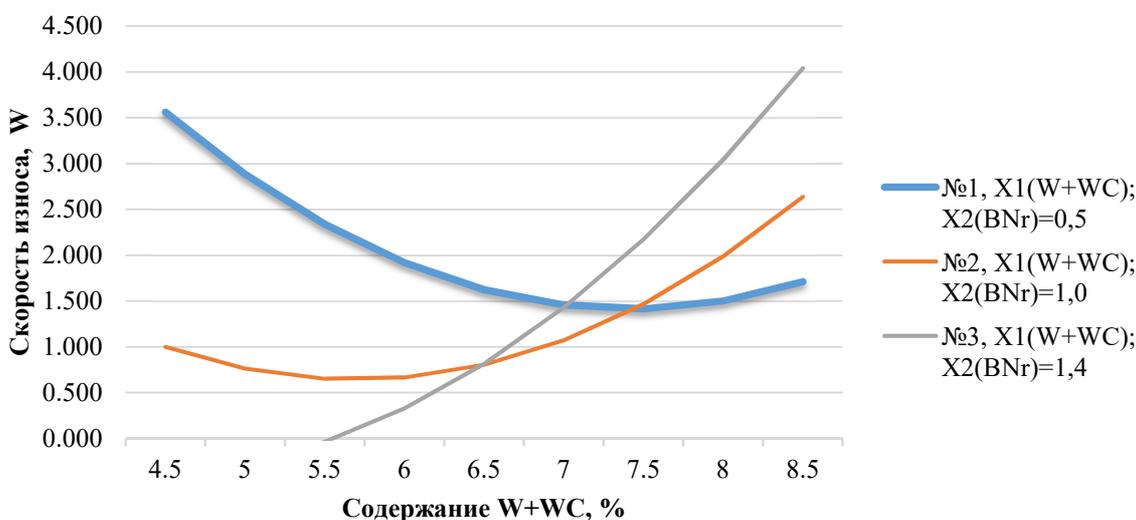


Рис. 5. Совмещенный график зависимости скорости износа от W+WC, при $B\Gamma=0,5; 1,0; 1,4$

Таким образом, из анализа графика, представленного на рис. 5, установлено, что оптимальное соотношение тугоплавких компонентов W+WC и $B\Gamma$ находятся в трех областях значения. При $B\Gamma=0,5$, W+WC от 6,5 до 8 %, при $B\Gamma=1,0$, W+WC от 4,5 до 6,5 %, при $B\Gamma=1,4$, W+WC $\approx 4,5$ %.

Для определения характера изменения скорости износа в зависимости от соотношения тугоплавких компонентов шихты, были построены графики при $X_1=const$, для значений: 4,5, 5,5, 7,5 рис. 6–9 [23–26].

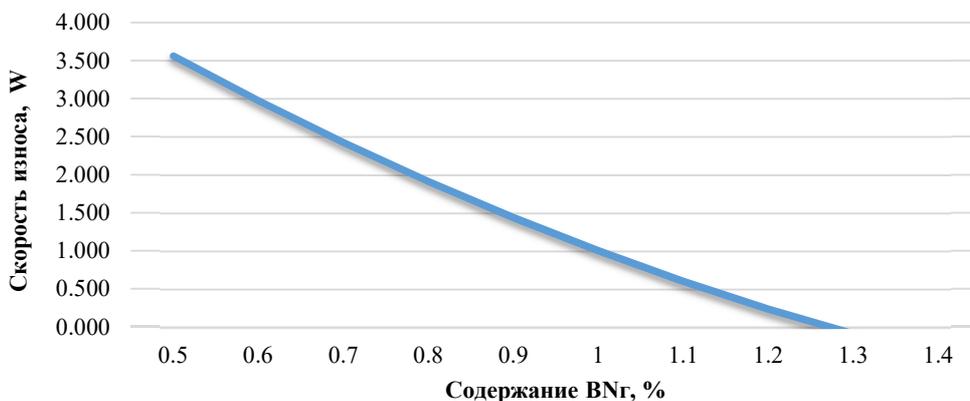


Рис. 6. График зависимости скорости износа от $B\Gamma$, при W+WC = 4,5

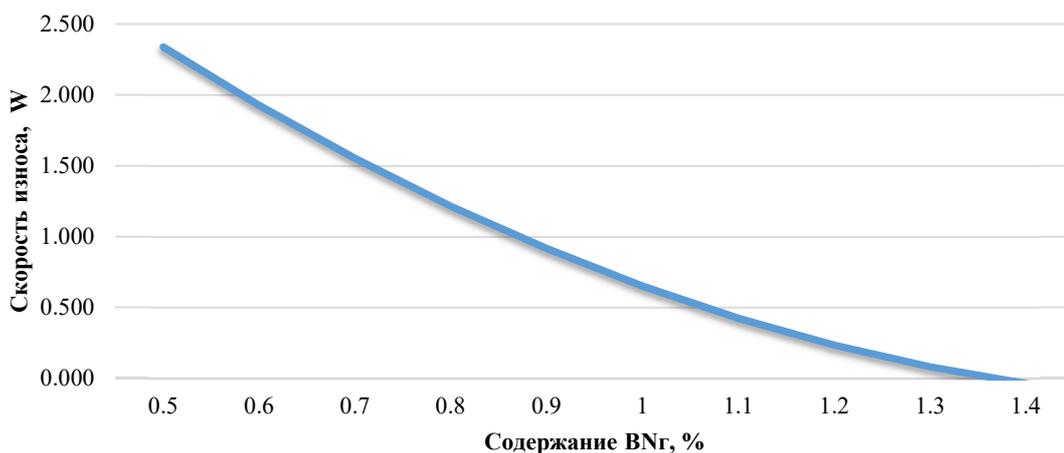


Рис. 7. График зависимости скорости износа от BNr, при W+WC =5,5

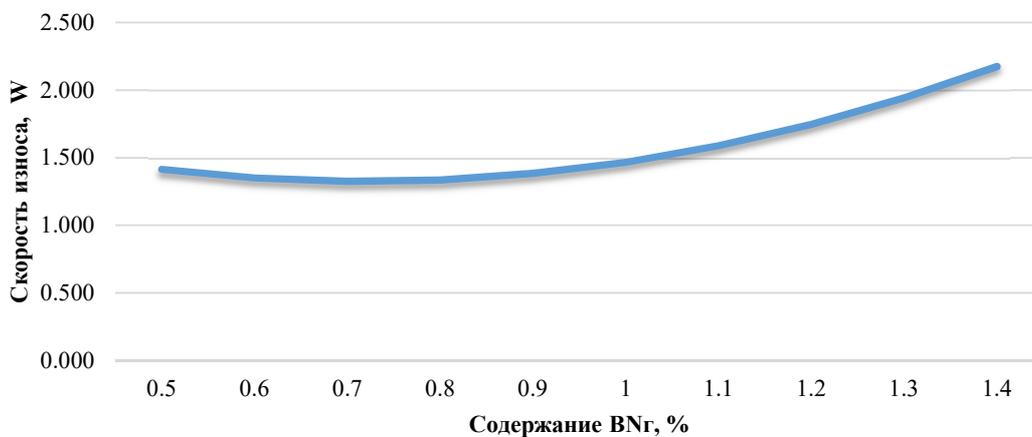


Рис. 8. График зависимости скорости износа от BNr, при W+WC =7,5

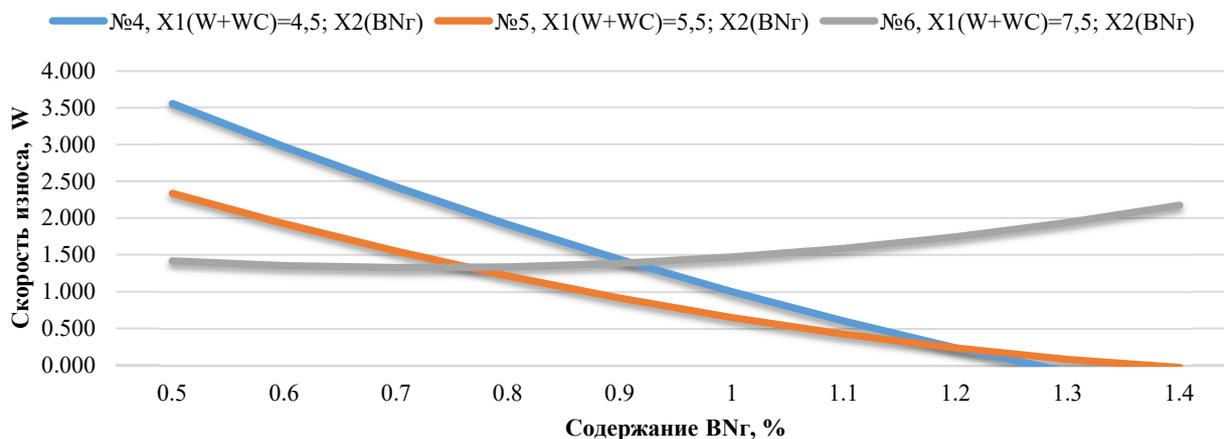


Рис. 9. Совмещенный график зависимости скорости износа от BNr, при W+WC =4,5; 5,5; 7,5

Таким образом, из анализа графика, представленного на рис. 9, наблюдается, что оптимальное соотношение тугоплавких компонентов W+WC и BNr находятся в трех областях значения. При W+WC = 4,5, BNr от 1,3 до 1,4 %, при W+WC = 5,5, BNr от 1,2 до 1,4 %, при W+WC = 7,5, BNr от 0,5 до 0,9 %. Минимальное значение BNr принимаем по расчетам регрессионной модели, а максимальное значение исходя из химических особенностей компонента.

Исходя из физической сущности процесса изнашивания, отрицательные значения скорости износа, полученные по расчетам регрессионной модели, для оптимизации соотношения химического состава тугоплавких компонентов не учитывались.

Выводы. В результате проведения «мысленных» опытов была выявлена необходимость дальнейших экспериментальных исследований,

влияния соотношения тугоплавких компонентов на скорость износа наплавленного материала.

Таким образом, проведенные комплексные исследования влияния вольфрама (W), карбида вольфрама (WC) и гексагонального нитрида бора (BNr) на адгезионную износостойкость наплаваемого материала позволили разработать регрессионную модель, устанавливающую зависимость скорости износа наплавленного материала от количественного соотношения вводимых тугоплавких компонентов порошковой проволоки.

Анализ результатов расчета регрессионной модели и «мысленные» опыты по определению оптимального соотношения химического состава тугоплавких компонентов порошковой проволоки позволил сформулировать следующие выводы и направление дальнейших исследований:

- установлено, что оптимальный диапазон соотношения тугоплавких компонентов порошковой проволоки составляет для W+WC от 4 до 7,5, а для BNr от 0,5 до 1,4;

- установлено, что полученная регрессионная модель позволяет описывать скорость износа наплавленного материала в диапазоне значений данного исследования;

- установлено, что в рамках дальнейшего направления исследований необходимо изготовление экспериментальной партии порошковой проволоки с содержанием тугоплавких компонентов в диапазоне установленных оптимальных значений.

Следующим этапом данной работы является экспериментальное исследование обрабатываемости резанием наплавленных слоев и определение уравнения регрессии с последующим комплексным обобщением в виде уравнения математической модели, которое будет определять оптимальное соотношение износостойкости и обрабатываемости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Титаренко В.И., Титаренко А.В., Ткаченко О.В., Голякевич А.А., Орлов Л.Н., Гиук С.П. Наплавочные технологии, оборудование и материалы – эффективный инструмент сокращения расходов на промышленных предприятиях // Сварщик. 2009. № 3. С. 22–27.

2. Makarov A., Vladimirov A., Kudryashov A., Baranov M. Increase of durability of CCM rollers by electric arc surfacing method with use of promising surfacing materials. Part 1. Structure, phase composition and properties of deposited layers // Chernye Metally. 2021. Pp. 15–19. DOI: 10.17580/chm.2021.09.02.

3. Устименко А.А., Кирнос О.Я., Нерод В.Я., Горелов В.П., Возьянов Е.И., Артемов В.И.,

Зинковский Г.В. О принципиальных особенностях разработки, производства и применения наплавочных материалов, предназначенных для поверхностного упрочнения роликов МНЛЗ // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2010. № 1 (1321). С. 74–77.

4. Yamaguchi J., Nakashima T., Sawai T. Change and Development of Continuous Casting Technology // Nippon steel technical report. 2013. № 104. Pp. 13–20. DOI: 621.746.047.

5. Стратегия развития черной металлургии России на 2014-2020 годы и на перспективу до 2030 года (утв. приказом Министерства промышленности и торговли РФ от 5 мая 2014 г. № 839).

6. Катунин В.В., Зиновьева Н.Г., Иванова И.М., Петракова Т.М. Основные показатели работы черной металлургии России в 2019 г // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. № 4. С. 309–335. DOI: 10.32339/0135-5910-2020-4-309-334

7. Угарова О.А. Анализ производства глобального продукта черной металлургии // Экономика в промышленности. 2013. № 4. С. 48–53.

8. Романова О.А., Сиротин Д.В. Стратегический вектор развития металлургии России в условиях новой реальности // Известия Уральского государственного горного университета. 2022. № 3 (67). С. 133–145. DOI: 10.21440/2307-2091-2022-3-133-145

9. Березовский А.В. Наплавочные материалы для упрочнения роликов МНЛЗ // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы I междунар. интерактив. науч.- практ. конф., г. Екатеринбург. 2012. Ч. 1. С. 34–37.

10. Du Toit, M., Van Niekerk, J. Improving the Life of Continuous Casting Rolls Through Submerged Arc Cladding with Nitrogen-Alloyed Martensitic Stainless Steel // Weld World. 2010. № 54. Pp. 342–349. DOI:10.1007/BF03266748.

11. Guthrie R.I.L., Isac M. Continuous Casting Practices for Steel: Past, Present and Future // Metals. 2022. Vol. 12(5). 862. DOI: 10.3390/met12050862.

12. Возьянов Е.И., Коробка О.В., Карауланов О.В., Лещинский Л.К., Матвиенко В.Н. Повышение эффективности работы роликов слывовых машин непрерывного литья заготовок // Металлург. 2018. № 7. С. 59–63. DOI:10.3390/met12050862

13. Кудряшов А.Е., Макаров А.В., Владимиров А.А. Повышение стойкости роликов рольганга методом электродуговой наплавки с применением перспективных наплавочных материалов, модифицированных тугоплавкими компонентами // Порошковая металлургия: инженерия

поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка: Сборник докладов 12-го Международного симпозиума. В 2-х частях. 2021. С. 123–127.

14. Репников Н.И., Макаров А.В., Кудряшов А.Е., Бойко П.Ф., Мамкин В.А. Определение перспективных наплавочных материалов для восстановления роликов вторичного охлаждения МНЛЗ с использованием структурных и трибологических методов исследований // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы тринадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2016. С. 280–284.

15. Соколов Г.Н., Зорин И.В., Артемьев А.А., Литвиненко-Архков В.Б., Дубцов Ю.Н., Лысак В.И., Харламов В.О., Самохин А.В., Цветков Ю.В. Особенности формирования структуры и свойств наплавленных сплавов под влиянием наночастиц тугоплавких соединений // Физика и химия обработки материалов. 2014. № 2. С. 38–47.

16. Бабинцев А.А., Рябцев И.А., Кондратьев И.А., Рябцев И.И., Гордань Г.Н. Исследование термической стойкости наплавленного металла, предназначенного для восстановления прокатных валков // Автоматическая сварка. 2014. № 5. С. 17–21.

17. Соколов Г.Н., Артемьев А.А., Дубцов Ю.Н., Еремин Е.Н. Влияние азота и частиц карбонитрида титана на структуру и свойства металла системы Fe-C-Cr-Ni-Mo, наплавленного порошковой проволокой // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 15–19.

18. Дубровский С.А., Попов А.В., Горпинченко М.А. Восстановление роликов МНЛЗ методом электрошлакового переплава // Сталь. 2013. № 12. С. 48–50.

19. Кирчу И.Ф., Степанова Т.В., Супрун М.В. Теплоустойчивая железохроммарганцевая

сталь перлитного класса с нитридванадиевым упрочнением для роликов слябовой МНЛЗ // Сталь. 2014. № 3. С. 83–87.

20. Yang K., Zhang Zx., Hu Wang, Bao Y., Jiang Y. A New Type of Submerged-Arc Flux-Cored Wire Used for Hardfacing Continuous Casting Rolls // Iron Steel Res. 2011. № 18. Pp. 74–79. DOI: 10.1016/S1006-706X(11)60120-9.

21. Ray A., Arora K.S., Lester S., Shome M. Laser cladding of continuous caster lateral rolls: Microstructure, wear and corrosion characterisation and on-field performance evaluation // Journal of Materials Processing Technology. 2014. Vol. 214. No. 8. Pp. 1566–1575. DOI: 10.1016/j.jmatproc.2014.02.027

22. Lin J.D., Huang P., He F. Research of Surfacing Technology on Continuous Casting // Roller Advanced Materials Research. 2011. Vol. 189–193. Pp. 3370–3376. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.3370

23. Kanishka K., Acherjee B. A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration // Journal of Manufacturing Processes. 2023. Vol. 89. № 3. Pp. 220–283.

24. Xu E., Zou F., Shan P. A multi-stage fault prediction method of continuous casting machine based on Weibull distribution and deep learning // Alexandria Engineering Journal. 2023. № 7 (77). Pp. 165–175. DOI:10.1016/j.aej.2023.06.079

25. Бердников С.Н., Подосян А.А., Вдовин К.Н., Бердников А.С. Причины поломки роликов МНЛЗ и поиск новых материалов и конструкций для их изготовления // Сталь. 2012. № 2. С. 95–98.

26. Лецинский Л.К., Матвиенко В.Н., Иванов В.П., Степнов К.К. Промышленное освоение технологии наплавки роликов МНЛЗ // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2019. Вип. 38. С. 87–94. DOI:10.31498/2225-6733.38.2019.181363

Информация об авторах

Новоточинов Александр Петрович, аспирант кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта. E-mail: alexander.nowotochinov@yandex.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». Россия, 309516, г. Старый Оскол, Белгородская обл., микрорайон им. Макаренко, д. 42.

Владимиров Александр Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта. E-mail: vladimirov.al.an@yandex.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». Россия, 309516, г. Старый Оскол, Белгородская обл., микрорайон им. Макаренко, д. 42

Поступила 06.03.2024 г.

© Новоточинов А.П., Владимиров А.А., Макаров А.В., 2025

*Novotochinov A.P., Vladimirov A.A., **Makarov A.V.**

Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarova (branch) NUST MISIS

*E-mail: alexander.nowotochinov@yandex.ru

RATIONAL COMPOSITION OF REFRACTORY COMPONENTS OF WELDING WIRE TO ENSURE WEAR RESISTANCE OF WORKING SURFACES OF PARTS

Abstract. A brief description of the operating conditions of metallurgical equipment parts and the defects that arise on them is presented. The technology of restoration and hardening surfacing with flux-cored wire under a layer of flux is presented. It has been established that the dominant refractory components of flux-cored wire, affecting the hardness and wear resistance of the deposited material, are tungsten (W), tungsten carbide (WC) and boron nitride (BN).

Cylindrical samples with a diameter of 80 mm and a height of 20 mm made of 30CrMnSi high quality steel were used as a substrate. Surfacing was carried out on an installation for automatic surfacing under a layer of flux in the scientific and technical laboratory of restoration and hardening of the National Research University «MISIS», with wires of the ASM 4430-SA grade under a layer of welding flux Ceramax UF-02. After surfacing, the samples were subjected to heat treatment. To conduct studies of the properties of the deposited material, the samples were pre-prepared. The samples were cut on a multifunctional cutting machine. Tribological tests of the samples were carried out on a high-temperature friction machine.

The results of experimental studies of wear rate and hardness of deposited materials are presented. A regression model has been developed to describe the influence of refractory components on the wear resistance of the deposited material. Based on the results of the study of the optimal ratio of the chemical composition of the refractory components of flux-cored wire on the wear resistance of the deposited material, further directions for research into the optimal ratio of the refractory components were formulated.

Keywords: flux-cored wire, regression model, boron nitride, tungsten carbide, tungsten, electric arc surfacing, wear rate, hardness

REFERENCES

1. Titarenko V.I., Titarenko A.V., Tkachenko O.V., Golyakevich A.A., Orlov L.N., Giyuk S.P. Surfacing technologies, equipment and materials are an effective tool for reducing costs at industrial enterprises [Naplavochnye tekhnologii, oborudovanie i materialy – effektivnyj instrument sokrashcheniya raskhodov na promyshlennyh predpriyatiyah]. Welder [Svarshchik]. 2009. No. 3. Pp. 22–27. (rus)
2. Makarov A., Vladimirov A., Kudryashov A., Baranov M. Increase of durability of CCM rollers by electric arc surfacing method with use of promising surfacing materials. Part 1. Structure, phase composition and properties of deposited layers. Cherny Metally. 2011. Pp. 15–19. DOI: 10.17580/chm.2021.09.02.
3. Ustimenko A.A., Kirnos O.Ya., Neroda V.Ya., Gorelov V.P., Vozyanov E.I., Artemov V.I., Zinkovsky G.V. On the fundamental features of the development, production and use of surfacing materials intended for surface hardening of continuous caster rollers [O principal'nyh osobennostyah razrabotki, proizvodstva i primeneniya naplavochnyh materialov, prednaznachennyh dlya poverhnostnogo uprochneniya rolikov MNLZ]. Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information [CHernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informacii]. 2010. No. 1 (1321). Pp. 74–77. (rus)
4. Yamaguchi J., Nakashima T., Sawai T. Change and Development of Continuous Casting Technology. Nippon steel technical report. 2013. No. 104. Pp. 13–20. DOI: 621.746.047.
5. Development strategy for the Russian ferrous metallurgy for 2014-2020 and for the future until 2030 (approved by order of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation [Strategiya razvitiya chernoj metallurgii Rossii na 2014–2020 gody i na perspektivu do 2030 goda (utv. prikazom Ministerstva promyshlennosti i trgovli RF) May 5, 2014. No. 839). (rus)
6. Katunin V.V., Zinovyeva N.G., Ivanova I.M., Petrakova T.M. Main performance indicators of the Russian ferrous metallurgy in 2019 [Osnovnye pokazateli raboty chernoj metallurgii Rossii v 2019 g]. Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information [Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informacii]. 2020. No. 4. Pp. 309–335. DOI: 10.32339/0135-5910-2020-4-309-334 (rus)
7. Ugarova O.A. Analysis of global iron and steel product production [Analiz proizvodstva global'nogo produkta chernoj metallurgii]. Economics in industry [Ekonomika v promyshlennosti]. 2013. No. 4. P. 48–53. (rus)
8. Romanova O. A., Sirotin D. V. Strategic vector for the development of Russian metallurgy in the context of the new reality [Strategicheskij vektor razvitiya metallurgii Rossii v usloviyah novoj real'nosti]. News of the Ural State Mining University

[Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta]. 2022. No. 3 (67). Pp. 133–145. DOI: 10.21440/2307-2091-2022-3-133-145 (rus)

9. Berezovsky A.V. Naplavochnye materialy dlya uprochneniya rolikov MNLZ. Surfacing materials for strengthening caster rollers [Innovacii v materialovedenii i metallurgii: materialy I mezhdunar. interaktiv. nauch.- prakt. konf., g. Ekaterinburg]. 2012. Vol. 1. Pp. 34–37. (rus)

10. Du Toit M., Van Niekerk J. Improving the Life of Continuous Casting Rolls Through Submerged Arc Cladding with Nitrogen-Alloyed Martensitic Stainless Steel. *Weld World*. 2010. No. 54. Pp. 342–349. DOI:10.1007/BF03266748.

11. Guthrie R.I.L., Isac M. Continuous Casting Practices for Steel: Past, Present and Future. *Metals*. 2022. Vol. 12. No. 5. P. 862. DOI: 10.3390/met12050862.

12. Vozyanov E.I., Korobka O.V., Karaulanov O.V., Leshchinsky L.K., Matvienko V.N. Increasing the efficiency of rollers of slab continuous casting machines [Povyshenie effektivnosti raboty rolikov slyabovyh mashin nepreryvnogo lit'ya zagotovok]. *Metallurgist [Metallurg]*. 2018. No. 7. Pp. 59–63. DOI: 10.3390/met12050862 (rus)

13. Kudryashov A.E., Makarov A.V., Vladimirov A.A. Increasing the durability of roller conveyor rollers using electric arc surfacing using advanced surfacing materials modified with refractory components [Povyshenie stojkosti rolikov rol'ganga metodom elektrodugovoj naplavki s primeneniem perspektivnyh naplavochnyh materialov, modifitsirovannyh tugoplavkimi komponentami]. *Powder metallurgy: surface engineering, new powder composite materials. Welding: Collection of reports of the 12th International Symposium. In 2 parts [Poroshkovaya metallurgiya: inzheneriya poverhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy. Svarka: Sbornik dokladov 12-go Mezhdunarodnogo simpoziuma. In 2 parts]*. April 07–09, 2021. Volume Part 2. 2021. Pp. 123–127. (rus)

14. Repnikov N.I., Makarov A.V., Kudryashov A.E., Boyko P.F., Mamkin V.A. Determination of promising surfacing materials for the restoration of secondary cooling rollers of continuous casters using structural and tribological research methods [Opredelenie perspektivnyh naplavochnyh materialov dlya vosstanovleniya rolikov vtorichnogo ohlazhdeniya MNLZ s ispol'zovaniem strukturnykh i tribologicheskikh metodov issledovaniy]. *Modern problems of the mining and metallurgical complex. Science and production: materials of the thirteenth All-Russian scientific and practical conference with international participation [Sovremennye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo: materialy trinadcatoy Vserossijskoj*

nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem]. 2016. Pp. 280–284. (rus)

15. Sokolov G.N., Zorin I.V., Artemyev A.A., Litvinenko-Ar'kov V.B., Dubcov Yu.N., Lysak V.I., Harlamov V.O., Samohin A.V., Cvetkov Yu.V. Features of the formation of the structure and properties of deposited alloys under the influence of nanoparticles of refractory compounds // *Physics and chemistry of materials processing [Osobennosti formirovaniya struktury i svoystv naplavlennykh splavov pod vliyaniem nanochastic tugoplavkikh soedinenij]. Physics and chemistry of materials processing [Fizika i himiya obrabotki materialov]*. 2014. No. 2. Pp. 38–47. (rus)

16. Babinets A.A., Ryabtsev I.A., Kondratyev I.A., Ryabtsev I.I., Gordan G.N. Study of the thermal resistance of deposited metal intended for the restoration of rolling rolls [Issledovanie termicheskoy stojkosti naplavlennogo metalla, prednaznachennogo dlya vosstanovleniya prokatnykh valkov]. *Automatic welding [Avtomaticeskaya svarka]*. 2014. No. 5. Pp. 17–21. (rus)

17. Sokolov G.N., Artemyev A.A., Dubtsov Yu.N., Eremin E.N. The influence of nitrogen and titanium carbonitride particles on the structure and properties of the metal of the Fe-C-Cr-Ni-Mo system, deposited with flux-cored wire [Vliyanie azota i chastic karbonitrida titana na strukturu i svoystva metalla sistemy Fe-C-Cr-Ni-Mo, naplavlennogo poroshkovoj provolokoj]. *Omsk Scientific Bulletin [Omskij nauchnyj vestnik]*. 2018. No. 2 (158). Pp. 15–19. (rus)

18. Dubrovsky S.A., Popov A.V., Gopinchenko M.A. Restoration of continuous caster rollers using electroslag remelting [Vosstanovlenie rolikov MNLZ metodom elektroshlakovogo pereplava]. *Steel [Stal']*. 2013. No. 12. Pp. 48–50. (rus)

19. Kirchu I.F., Stepanova T.V., Suprun M.V. Heat-resistant iron-chromium-manganese pearlitic steel with vanadium nitride hardening for slab caster rollers [Teploustojchivaya zhelezohrommangancevaya stal' perlitnogo klassa s nitridvanadievym uprochneniem dlya rolikov slyabovoj MNLZ]. *Steel [Stal']*. 2014. No. 3. Pp. 83–87. (rus)

20. Yang K., Zhang Zx., Hu Wang, Bao Y., Jiang Y. A New Type of Submerged-Arc Flux-Cored Wire Used for Hardfacing Continuous Casting Rolls. *Iron Steel Res.* 2011. No. 18. Pp. 74–79. DOI: 10.1016/S1006-706X(11)60120-9.

21. Ray A., Arora K.S., Lester S., Shome M. Laser cladding of continuous caster lateral rolls: Microstructure, wear and corrosion characterization and on-field performance evaluation. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Vol. 214. No. 8. Pp. 1566–1575. DOI: 10.1016/j.jmatproc.2014.02.027

22. Lin J.D., Huang P., He F. Research of Surfacing Technology on Continuous Casting. *Roller Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 189–193. Pp. 3370–3376. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.3370

23. Kanishka K., Acherjee B. A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023. Vol. 89. No. 3. Pp. 220–283.

24. Xu E., Zou F., Shan P. A multi-stage fault prediction method of continuous casting machine based on Weibull distribution and deep learning. *Alexandria Engineering Journal*. 2023. No. 7 (77). Pp. 165–175. DOI:10.1016/j.aej.2023.06.079

25. Berdnikov S.N., Podosyan A.A., Vdovin K.N., Berdnikov A.S. Causes of failure of continuous caster rollers and the search for new materials and designs for their manufacture [Prichiny polomki rolikov MNLZ i poisk novyh materialov i konstrukcij dlya ih izgotovleniya]. *Steel [Stal']*. 2012. No. 2. Pp. 95–98. (rus)

26. Leshchinsky L.K., Matvienko V.N., Ivanov V.P., Stepnov K.K. Industrial development of technology for surfacing caster rollers [Promyshlennoe osvoenie tekhnologii naplavki rolikov MNLZ]. *Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences [Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki]*. 2019. No. 38. Pp. 87–94. (rus)

Information about the authors

Novotochinov, Alexander P. Postgraduate student. E-mail: alexander.nowotochinov@yandex.ru. Sary Oskol Technological Institute named after. A.A. Ugarova (branch) NUST MISIS. Russia, 309516, Sary Oskol, Belgorod region, Makarenko microdistrict, 42.

Vladimirov, Alexander A. PhD. E-mail: vladimirov.al.an@yandex.ru. Sary Oskol Technological Institute named after. A.A. Ugarova (branch) NUST MISIS. Russia, 309516, Sary Oskol, Belgorod region, Makarenko microdistrict, 42.

Received 06.03.2024

Для цитирования:

Новоточинов А.П., Владимиров А.А., Макаров А.В. Рациональный состав тугоплавких компонентов наплавочной проволоки обеспечения износостойкости рабочих поверхностей деталей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С. 117–129. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-117-129

For citation:

Novotochinov A.P., Vladimirov A.A., Makarov A.V. Rational composition of refractory components of welding wire to ensure wear resistance of working surfaces of parts. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 2. Pp. 117–129. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-117-129