

УДК 519.237: 669.018.25

РАЗРАБОТКА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ НАПЛАВКИ ДЕТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ИЗНОСА

Гусев А.И., аспирант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства (allxx85@mail.ru)

Усольцев А.А., к.т.н., доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства (a.us_@rambler.ru)

Козырев Н.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой материаловедения, литейного и сварочного производства (kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru)

Кибко Н.В., к.т.н., доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства (krivicheva_nv@mail.ru)

Бащенко Л.П., к.т.н., старший преподаватель кафедры теплоэнергетики и экологии, ответственный секретарь редакции журнала «Известия вузов. Черная металлургия» (luda.baschenko@gmail.com)

Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Разработана и исследована порошковая проволока для наплавки абразивно-изнашивающихся изделий системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo типа А по классификации МИС. Исследования в лабораторных условиях осуществляли по следующей схеме: многослойную наплавку образцов проводили с предварительным подогревом пластин до 350 °С и последующим (после наплавки) замедленным охлаждением. Наплавку осуществляли сварочным трактором ASAW-1250 с использованием изготовленной порошковой проволоки на пластины из стали 09Г2С в шесть слоев. В состав проволоки взамен аморфного углерода вводили углеродфторсодержащую пыль, содержащую: 21–46 % Al_2O_3 ; 18–27 % F; 8–15 % Na_2O ; 0,4–6,0 % K_2O ; 0,7–2,3 % CaO; 0,5–2,5 % SiO_2 ; 2,1–3,3 % Fe_2O_3 ; 12,5–30,2 % $C_{общ}$; 0,07–0,90 % MnO; 0,06–0,90 % MgO; 0,09–0,19 % S; 0,10–0,18 % P. В качестве наполнителя использовали порошкообразные материалы: порошок железа марки ПЖВ1 по ГОСТ 9849–86, порошок ферросилиция марки ФС 75 по ГОСТ1415–93, порошок высокоуглеродистого феррохрома марки ФХ900А по ГОСТ 4757–91, порошок углеродистого ферромарганца ФМн 78(А) по ГОСТ 4755–91, порошок никеля ПНК-1Л5 по ГОСТ 9722–97, порошок ферромolibдена марки ФМо60 по ГОСТ 4759–91, порошок феррованадия марки ФВ50У 0,6 по ГОСТ 27130–94, порошок кобальта ПК-1У по ГОСТ 9721–79, порошок вольфрамовый ПВН ТУ 48-19-72–92. Исследования наплавленного слоя показали, что в полученных пределах углерод, хром, молибден, никель, марганец и в незначительной мере ванадий одновременно увеличивают твердость наплавленного слоя и уменьшают скорость износа образцов. Повышение концентрации вольфрама несколько увеличивает твердость наплавленного металла, однако при этом снижается износостойкость. Низкая вязкость матрицы не позволяет удерживать на поверхности карбиды вольфрама, в результате чего износ осуществляется не по схеме равномерного истирания поверхности, а по схеме выкрошивания высокопрочных частиц карбидов из матрицы, в результате чего в ней образуются дополнительные трещины, способствующие дополнительному износу матрицы. Введение в состав шихты кобальта не оказывает заметного влияния на твердость и абразивный износ наплавленного слоя, что связано с получением более вязкой, но менее твердой матрицы. В случае отсутствия твердых частиц карбидов, вмонтированных в матрицу, эффект от введения кобальта отрицательный. По результатам проведенного многофакторного корреляционного анализа определены зависимости твердости наплавленного слоя и его износостойкости от массовой доли элементов, входящих в состав порошковых проволок системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Mo–Ni–V–Co.

Ключевые слова: порошковая проволока, наплавка, износостойкость, твердость, наплавочные материалы.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-11-898-906

Повышение работоспособности деталей и узлов, работающих в условиях ударно-абразивного износа, путем электродуговой наплавки является важнейшим резервом увеличения объема производства продукции и экономии металла за счет продления срока службы оборудования. Разработка новых материалов, значительно повышающих износостойкость таких деталей, и использование технологии их восстановления являются весьма важными и актуальными задачами [1–14]. Одним из основных вопросов при разработке нового

наплавочного материала является выбор системы легирования сплава, при котором необходимо учитывать условия работы детали, стоимость наплавочного материала, результаты испытания различных материалов в лабораторных и натурных условиях, а также характер и твердость различных фаз, их количество и т.д. Благодаря оптимально подобранному способу легирования наплавленные покрытия обладают высокой твердостью, абразивной и ударно-абразивной износостойкостью.

В настоящее время для легирования материалов, используемых в условиях абразивного износа, в основном используются наплавочные материалы (сплавы на железоуглеродистой основе), содержащие хром, марганец, никель. В сочетании с перечисленными элементами в наплавочные материалы также вводят карбидообразующие элементы: вольфрам, ванадий, титан, молибден. Широкое распространение для наплавки абразивно-изнашивающихся изделий получили наплавочные проволоки систем Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo типа А и В по классификации МИС [15 – 18]. Исследования проводили в лабораторных условиях: изучали многослойную наплавку образцов с предварительным подогревом пластин до 350 °С и последующим (после наплавки) замедленным охлаждением. Наплавку осуществляли сварочным трактором ASAW-1250 с использованием изготовленной порошковой проволоки на пластины. В состав ряда образцов проволоки вводили никель, кобальт, вольфрам. Аморфный углерод заменили на углеродфторсодержащую пыль следующего химического состава: 21 – 46 % Al_2O_3 ; 18 – 27 % F; 8 – 15 % Na_2O ; 0,4 – 6,0 % K_2O ; 0,7 – 2,3 % CaO; 0,5 – 2,5 % SiO_2 ; 2,1 – 3,3 % Fe_2O_3 ; 12,5 – 30,2 % $C_{общ}$; 0,07 – 0,90 % MnO; 0,06 – 0,90 % MgO; 0,09 – 0,19 % S; 0,10 – 0,18 % P. Дисперсность такого материала позволяет проводить хорошее смешение с металлической составляющей шихты порошковой проволоки. Наплавку осуществляли на пластины из стали 09Г2С в шесть слоев.

Изготовление проволоки проводили на лабораторной машине. Диаметр изготовленной проволоки 5 мм, оболочка выполнена из ленты СтЗ. В качестве наполнителя использовали порошкообразные материалы: порошок железа марки ПЖВ1 по ГОСТ 9849 – 86, порошок ферросилиция марки ФС 75 по ГОСТ 1415 – 93, порошок высокоуглеродистого феррохрома марки ФХ900А по ГОСТ 4757 – 91, порошок углеродистого ферромарганца ФМн 78(А) по ГОСТ 4755 – 91, порошок никеля ПНК-1Л5 по ГОСТ 9722 – 97, порошок ферромолибдена марки ФМо60 по ГОСТ 4759 – 91, порошок феррованадия марки ФВ50У 0,6 по ГОСТ 27130 – 94, порошок кобальта ПК-1У по ГОСТ 9721 – 79, порошок вольфрамовый ПВН ТУ 48-19-72 – 92.

Химический состав наплавленного металла определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71 (табл. 1). Измерение твердости исследуемых образцов выполняли по методу Роквелла в соответствии с требованиями ГОСТ 9013 – 59.

Металлографические исследования микрошлифов осуществляли с помощью оптического микроскопа OLYMPUSGX-51 в светлом поле в диапазоне увеличений 100 – 1000 после травления поверхности образцов в 4 %-ном растворе азотной кислоты (рис. 1). Величину зерна определяли по ГОСТ 5639 – 82 при увеличении 100. Дисперсность мартенсита оценивали при сопоставлении структуры с эталонами соответствующих

шкал и размеров игл мартенсита с данными таблицы № 6 ГОСТ 8233 – 56. Длину игл мартенсита определяли с помощью пакета прикладных программ для металлографических исследований SiamPhotolab 700. Исследования продольных образцов наплавленного слоя на наличие неметаллических включений проводили по ГОСТ 1778 – 70. Полированную поверхность изучали при увеличении 100 с помощью металлографического микроскопа ЛабоМет-1И.

Скорость истирания наплавленного слоя опытных образцов определяли путем проведения испытаний на износ на машине 2070 СМТ-1 по схеме диск – колодка со следующими параметрами: диапазон измерения частоты вращения вала нижнего образца (диапазон А) 75 – 750 мин⁻¹; диапазон измерения момента трения (диапазон I) 1 – 10 Н·м.

Металлографические исследования (табл. 2) показали, что микроструктура наплавленного слоя порошковой проволокой системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Mo–Ni–V–Co состоит из мартенсита, формирующегося внутри границ бывшего аустенитного зерна, аустенита остаточного, присутствующего в небольшом количестве в виде отдельных островков, и тонких прослоек δ-феррита, располагающегося по границам бывших зерен аустенита. При отсутствии хрома – структура феррито-перлитная.

Считается, что наиболее благоприятными основами для износостойких сплавов при восстановлении деталей оборудования являются мартенситная и аустенитная. При этом, в зависимости от общего строения сплава и наличия избыточных фаз, в разных случаях предпочтительной может оказаться та или другая основа. Совмещение этих двух основ (мартенсита с определенным количеством аустенита) может обеспечить наиболее благоприятное сочетание свойств наплавленного сплава.

С увеличением содержания углерода в сплаве возрастает количество остаточного аустенита, а также карбидов и карбидная неоднородность. При высоком содержании хрома в сплаве (кроме образования специальных карбидов хрома) происходит упрочнение хромом аустенита и мартенсита. Хром, как и углерод, в целом способствует повышению не только твердости, но и износостойкости металла.

Введение разного количества марганца и никеля в состав наплавочных материалов позволяет менять содержание остаточного аустенита, который, в свою очередь, может по-разному влиять на износостойкость материалов. Марганец и никель сходны в том отношении, что они оба растворяются в аустените, увеличивают его устойчивость и способствуют тем самым росту количества остаточного аустенита. Никель не входит в состав карбидов и в основном легирует в твердый раствор (основу). Марганец содержится как в твердом растворе, так, частично, и в карбидах. С повышением количества марганца в материале возрастает склонность к росту зерна при нагреве, что неблагоприятно сказывается на

Т а б л и ц а 1

Химический состав наплавленных слоев

Table 1. Chemical composition of the deposited layers

Образец	Содержание элемента, %													
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	W	Ti	V	S	P
Г5	0,40	0,72	0,84	5,26	0,52	0,42	0,020	0,100	0,07	0,001	0,003	0,050	0,037	0,025
Г6	0,45	0,80	0,77	4,98	0,50	0,56	0,020	0,110	0,07	0,001	0,005	0,040	0,044	0,023
Г7	0,27	0,78	0,77	5,50	0,48	0,61	0,020	0,080	0,10	0,001	0,001	0,040	0,042	0,019
Г8	0,38	0,62	0,80	4,98	0,47	0,82	0,020	0,090	0,07	0,001	0,020	0,040	0,038	0,020
Г9	0,19	0,77	0,61	4,17	0,38	0,34	0,108	0,051	0,07	0,001	0,012	0,020	0,054	0,024
Г10	0,19	0,63	0,65	4,06	0,38	0,30	0,066	0,056	0,08	0,001	0,024	0,030	0,056	0,019
Г11	0,20	0,59	0,61	4,12	0,38	0,30	0,031	0,121	0,06	0,001	0,007	0,020	0,049	0,019
Г12	0,20	0,64	0,60	4,03	0,39	0,30	0,052	0,199	0,08	0,001	0,020	0,030	0,058	0,021
Г13	0,20	0,59	0,56	0,01	0,33	0,30	0,019	0,053	0,10	7,740	0,005	0,005	0,072	0,017
Г14	0,20	0,55	0,49	0,01	0,34	0,26	0,025	0,071	0,09	7,420	0,001	0,010	0,048	0,014
Г15	0,20	0,58	0,52	0,01	0,34	0,28	0,057	0,071	0,09	7,550	0,003	0,010	0,038	0,014
Г16	0,21	0,55	0,52	0,01	0,35	0,27	0,054	0,061	0,08	7,650	0,001	0,020	0,036	0,017
Г131	0,26	0,78	1,49	7,10	0,39	0,32	0,082	0,001	0,07	0,001	0,010	0,020	0,033	0,009
Г141	0,22	0,73	1,38	5,95	0,32	0,29	0,095	0,001	0,09	0,001	0,033	0,030	0,029	0,014
Г151	0,26	0,75	1,23	6,30	0,32	0,30	0,085	0,001	0,09	0,001	0,003	0,020	0,034	0,012
Г161	0,26	0,75	1,16	6,06	0,34	0,30	0,077	0,001	0,09	0,001	0,024	0,040	0,033	0,016
Г17	0,13	0,56	0,91	3,94	0,25	0,26	0,020	0,003	0,08	0,030	0,001	0,006	0,033	0,017
Г18	0,17	0,61	1,20	6,00	0,37	0,39	0,014	0,002	0,10	0,025	0,002	0,006	0,033	0,015
Г19	0,17	0,54	1,19	5,90	0,37	0,38	0,009	0,002	0,01	1,640	0,002	0,002	0,033	0,015
Г20	0,10	0,49	0,92	4,15	0,23	0,25	0,009	0,004	0,09	0,025	0,001	0,030	0,033	0,017
Г21	0,19	0,54	1,15	6,21	0,38	0,40	0,007	0,002	0,09	0,025	0,002	0,040	0,031	0,015
Г22	0,23	0,67	0,94	4,18	0,40	0,27	0,030	0,013	0,07	0,040	0,001	0,005	0,029	0,016
Г23	0,28	0,61	0,93	3,57	0,39	0,27	0,020	0,020	0,07	4,660	0,001	0,003	0,032	0,015
Г24	0,21	0,78	1,01	4,12	0,37	0,26	0,00	0,190	0,07	0,080	0,001	0,008	0,030	0,015

его свойствах (увеличивается хрупкость). Легирование наплавочных материалов вольфрамом и ванадием приводит к образованию карбидов, что повышает их износостойкость. К тому же вольфрам, находясь в твердом растворе, в некоторой степени увеличивает устойчивость аустенита.

Анализ полученных результатов показал, что степень влияния различных химических элементов на твердость наплавленного слоя и скорость износа образцов разная. В исследуемых пределах углерод, хром, молибден, никель, марганец и в незначительной мере ванадий одновременно повышают твердость наплавленного слоя и уменьшают скорость износа образцов (рис. 2 – 7).

При исследовании влияния вольфрама и кобальта на свойства наплавленного слоя (рис. 8, 9) установлено, что повышение концентрации вольфрама несколько увеличивает твердость наплавленного металла, однако при этом снижается износостойкость. Это, по-видимо-

му, связано с высокопрочной твердой мартенситной матрицей, в которую «вмонтированы» более твердые карбиды вольфрама. Низкая вязкость матрицы не позволяет удерживать на поверхности карбиды вольфрама, в результате чего износ осуществляется не по схеме равномерного истирания поверхности, а по схеме выкрошивания высокопрочных частиц карбидов из матрицы, в результате чего в ней образуются трещины, способствующие дополнительному износу матрицы.

Введение в состав шихты кобальта не оказывает заметного влияния на твердость и абразивный износ наплавленного слоя, что связано с получением более вязкой, но менее твердой матрицы. В случае отсутствия твердых частиц карбидов, вмонтированных в матрицу, эффект от введения кобальта отрицательный. Следует также отметить, что влияние вольфрама на твердость наплавленного слоя и скорость износа образцов, в первую очередь, связано со структурой металлической матрицы, причем замена мартенситной структуры

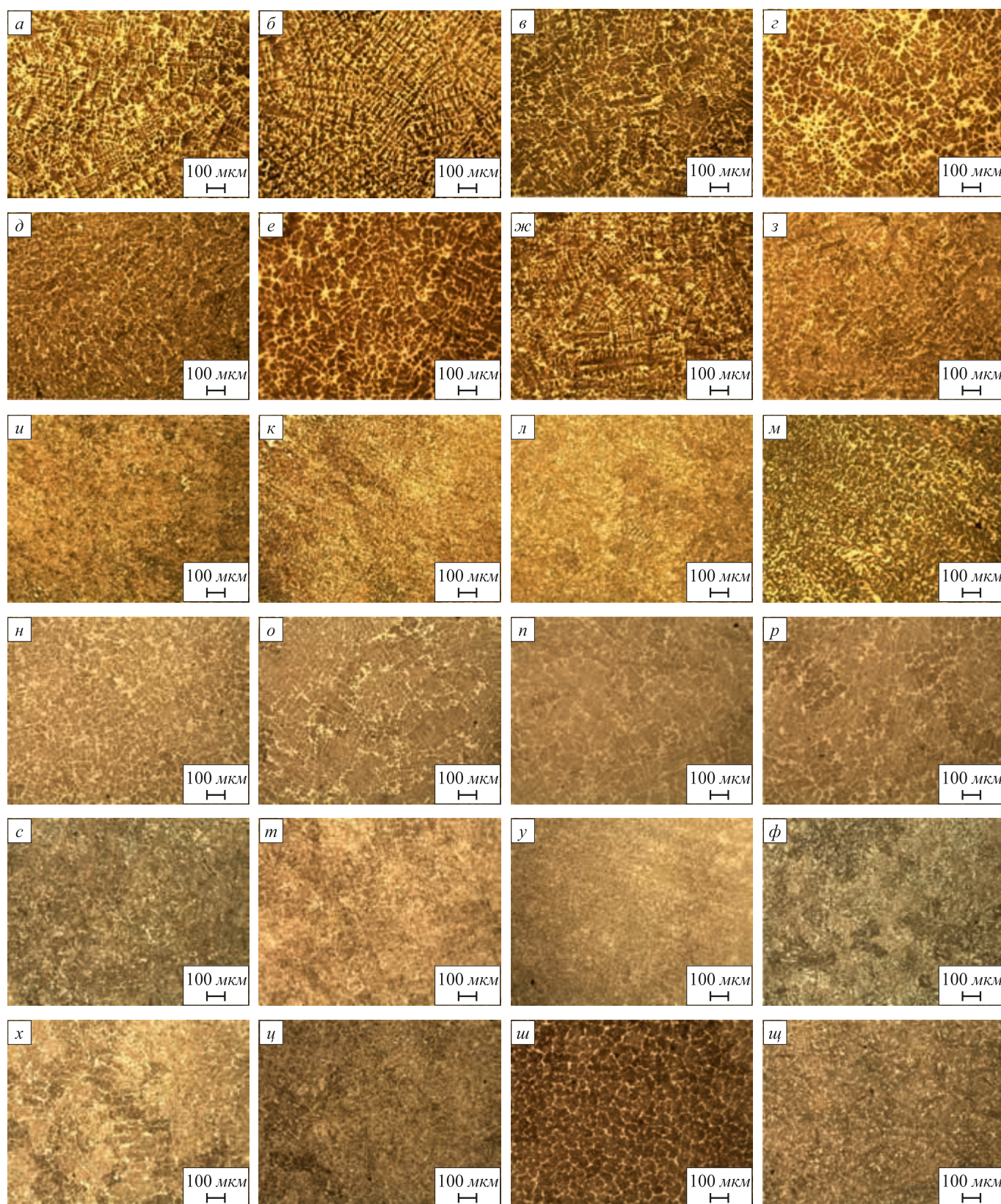


Рис. 1. Микроструктура образцов наплавленного слоя:
a – м – Г5 – Г16; н – Г131; о – Г141; п – Г151; р – Г161; с – щ – Г17 – Г24

Fig. 1. Microstructure of the samples of deposited layer:
a – м – Г5 – Г16; н – Г131; о – Г141; п – Г151; р – Г161; с – щ – Г17 – Г24

Т а б л и ц а 2

Характеристики наплавленного металла

Table 2. Properties of the deposited metal

Образец	Структура	Величина зерна аустенита	HRC	Скорость истирания, г/об
Г5	Мартенсит	7	49,0	0,0000140
Г6	Мартенсит	6 и 7	52,0	0,0000056
Г7	Мартенсит	6	50,0	0,0000710
Г8	Мартенсит	6 и 7	52,0	0,0000140
Г9	Мартенсит	6 и 7	44,5	0,0000710
Г10	Мартенсит	6 и 7	42,5	0,0000390
Г11	Мартенсит	6 и 7	42,5	0,0000440
Г12	Мартенсит	6 и 7	37,0	0,0000730
Г13	Феррито-перлитная	5 и 6	22,5	0,0002060
Г14	Феррито-перлитная	6	25,5	0,0000480
Г15	Феррито-перлитная	5	22,0	0,0000360
Г16	Феррито-перлитная	6	26,0	0,0000390
Г131	Мартенсит	7	55,0	0,0000280
Г141	Мартенсит	7	41,0	0,0000550
Г151	Мартенсит	7	45,0	0,0000074
Г161	Мартенсит	7	45,0	0,0000340
Г17	Мартенсит	6 – 7;	40,0	0,0000280
Г18	Мартенсит	6	45,0	0,0000540
Г19	Мартенсит	6	49,0	0,0000430
Г20	Мартенсит	6 – 7;	38,0	0,0001420
Г21	Мартенсит	6	48,0	0,0000550
Г22	Мартенсит	6	43,0	0,0000330
Г23	Мартенсит	6 – 7;	49,0	0,0000650
Г24	Мартенсит	6 – 7;	42,0	0,0000300

в наплавленном слое на феррито-перлитную также не оказало большого положительного влияния на износостойкость.

Оценку влияния химического состава порошковых проволок на скорость износа и твердость наплавленного слоя проводили математико-статистическими методами, которые позволяют изучить закономерности изменения результирующего показателя в зависимости от поведения различных факторов по методикам, изложенным в работах [19 – 21].

Для проведения анализа были определены факторы, которые оказывают воздействие на изучаемый показатель, и отобраны наиболее существенные из них (см. табл. 1, 2). После этого выполнена проверка исходной информации на достоверность, однородность,

соответствие закону нормального распределения. Далее построена математическая модель многофакторной системы. Поскольку в приведенных системах имеют место независимые факторные признаки, используется детерминированный факторный анализ.

По результатам вычислений получены зависимости, адекватность которых фактическим значениям проверена по показателю средней ошибки аппроксимации:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{Y_i - \tilde{Y}_i}{Y_i} \right| \cdot 100, \quad (1)$$

где m – количество наблюдений; \tilde{Y}_i – вычисленное значение результирующего показателя; Y_i – фактическое значение результирующего показателя.

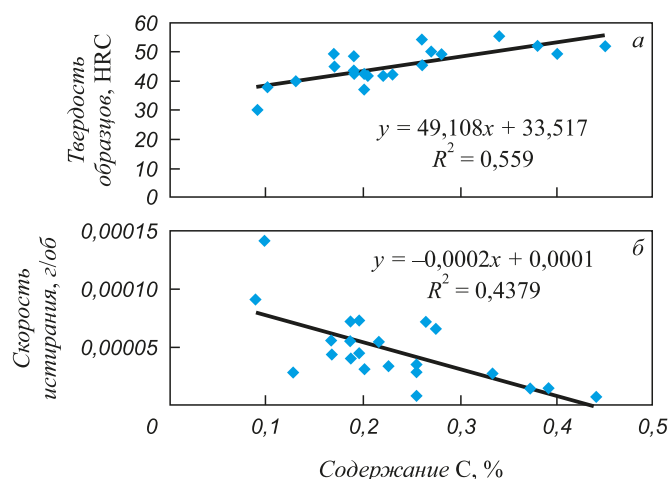


Рис. 2. Влияние содержания углерода на твердость и скорость истирания наплавленного слоя

Fig. 2. Influence of carbon content on hardness and abrasion rate of the deposited layer

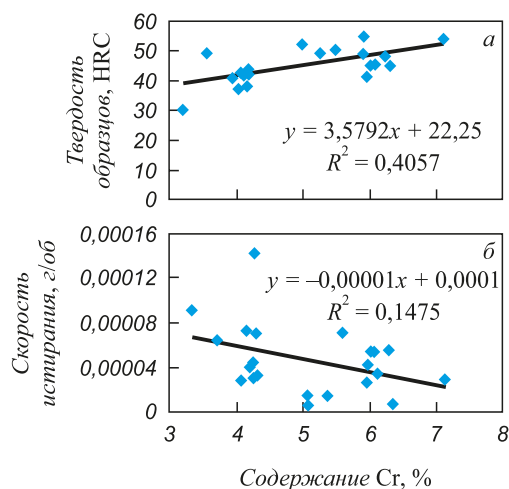


Рис. 3. Влияние содержания хрома на твердость и скорость истирания наплавленного слоя

Fig. 3. Influence of chromium content on hardness and abrasion rate of the deposited layer

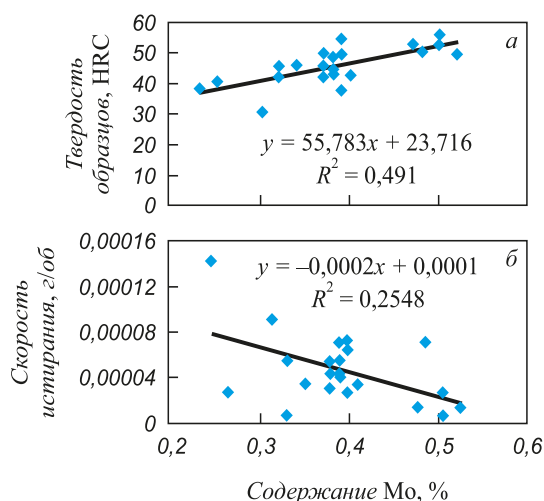


Рис. 4. Влияние содержания молибдена на твердость и скорость истирания наплавленного слоя

Fig. 4. Influence of molybdenum content on hardness and abrasion rate of the deposited layer

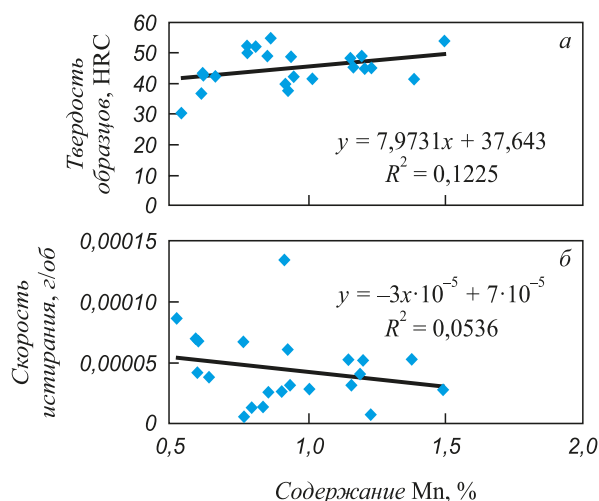


Рис. 6. Влияние содержания марганца на твердость и скорость истирания наплавленного слоя

Fig. 6. Influence of manganese content on hardness and abrasion rate of the deposited layer

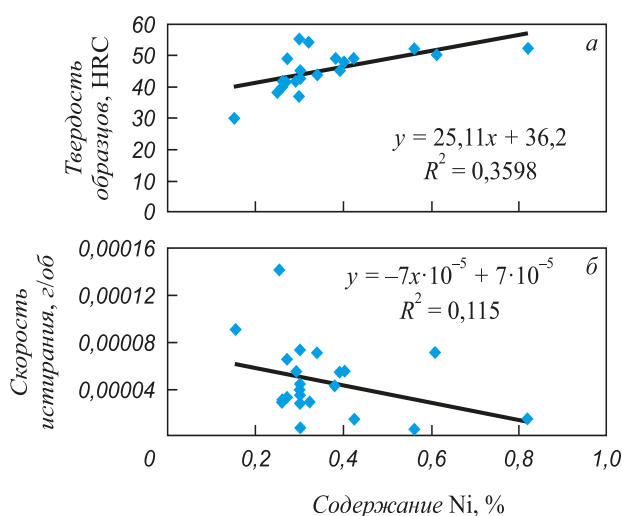


Рис. 5. Влияние содержания никеля на твердость и скорость истирания наплавленного слоя

Fig. 5. Influence of nickel content on hardness and speed abrasion rate of the deposited layer

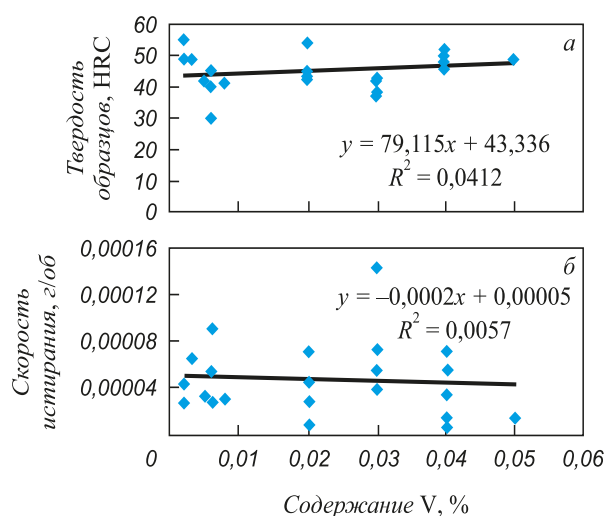


Рис. 7. Влияние содержания ванадия на твердость и скорость истирания наплавленного слоя

Fig. 7. Influence of vanadium content on hardness and abrasion rate of the deposited layer

Зависимости твердости наплавленного слоя и его износостойкости от массовой доли элементов, входящих в состав порошковых проволок системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Mo–Ni–V–Co, полученные в результате проведенного анализа, приведены ниже.

• Твердость наплавленного слоя:

$$\begin{aligned} \text{HRC} = & 35,884 + 22,840\text{C} + 11,079\text{Si} - 15,903\text{Mn} + \\ & + 4,785\text{Cr} + 10,118\text{Mo} + 1,399\text{Ni} - 38,964\text{Al} - \\ & - 24,126\text{Co} - 65,841\text{Cu} - 0,057\text{W} + 17,887\text{Ti} - \\ & - 76,116\text{V} - 76,351\text{S} - 239,206\text{P} \end{aligned}$$

(ошибка аппроксимации составляет 4,2 %);

• Скорость износа образцов (И):

$$\begin{aligned} \text{И} = & -0,00025 - 0,00034\text{C} + 0,000171\text{Si} + \\ & + 0,000144\text{Mn} - 0,000008\text{Cr} - 0,00014\text{Mo} + \\ & + 0,0000308\text{Ni} - 0,00076\text{Al} - 0,000088\text{Co} + \\ & + 0,000227\text{Cu} + 0,0000074\text{W} + 0,00017\text{Ti} + \\ & + 0,000633\text{V} + 0,002836\text{S} + 0,005644\text{P} \end{aligned}$$

(ошибка аппроксимации составляет 8,14 %).

Вычисленные значения средней ошибки аппроксимации свидетельствуют о том, что полученные зависимости являются адекватными и их можно использовать для определения результирующих показателей.

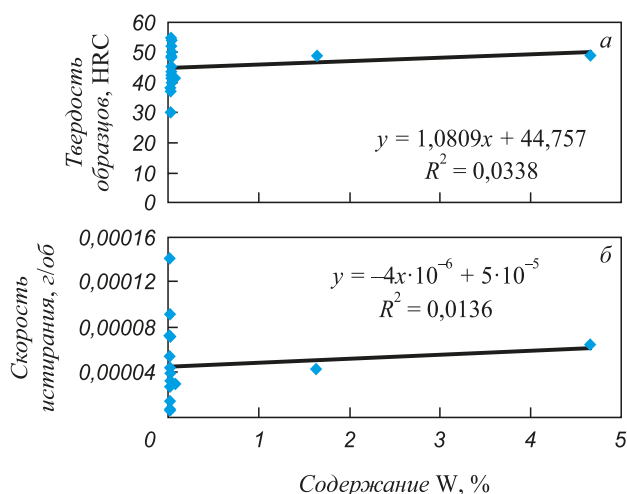


Рис. 8. Влияние содержания вольфрама на твердость и скорость истирания наплавленного слоя

Fig. 8. Influence of tungsten content on hardness and abrasion rate of the deposited layer

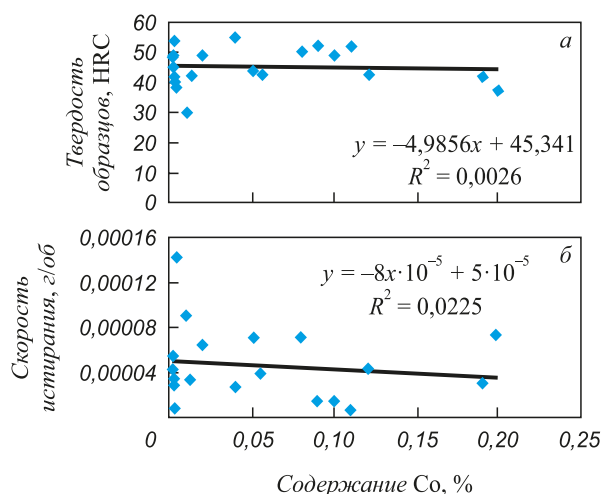


Рис. 9. Влияние содержания кобальта на твердость и скорость истирания наплавленного слоя

Fig. 9. Influence of cobalt content on hardness and abrasion rate of the deposited layer

Полученные функциональные зависимости были использованы для прогнозирования твердости наплавленного слоя и его износостойкости при изменении химического состава наплавленного металла, а результаты исследований использованы при разработке порошковой проволоки, защищенной патентом РФ [22].

Выводы. В исследуемых пределах углерод, хром, молибден, никель, марганец и в незначительной мере ванадий одновременно повышают твердость наплавленного слоя и уменьшают скорость износа образцов. Установлено, что повышение концентрации вольфрама несколько увеличивает твердость наплавленного металла, однако при этом снижается износостойкость. Показано, что низкая вязкость матрицы не позволяет удерживать на поверхности карбиды вольфрама, в результате чего износ осуществляется не по схеме равномерного истирания поверхности, а по схеме выкрошивания высокопрочных частиц карбидов из матрицы, в результате чего в ней образуются дополнительные трещины, способствующие дополнительному износу матрицы. Показано, что введение в состав шихты кобальта не оказывает заметного влияния на твердость и абразивный износ наплавленного слоя, что связано с получением более вязкой, но менее твердой матрицы. В случае отсутствия твердых частиц карбидов, вмонтированных в матрицу, эффект от введения кобальта отрицательный. По результатам проведенного многофакторного корреляционного анализа были определены зависимости твердости наплавленного слоя и его износостойкости от массовой доли элементов, входящих в состав порошковых проволок системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Mo–Ni–V–Co. Полученные зависимости могут быть использованы для прогнозирования твердости наплавленного слоя и его износостойкости при изменении химического состава наплавленного металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kirchgaßner M., Badisch E., Franek F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact // *Wear Journal*. 2008. Vol. 265. No. 5 – 6. P. 772 – 779.
2. Тепляшин М.В., Комков В.Г. Исследование влияния легирующих элементов на износостойкость в сплавах, предназначенных для электрошлаковой наплавки бил молотковых мельниц // *Ученые заметки ТОГУ*. 2013. Т. 4. № 4. С. 1554 – 1561.
3. Тепляшин М.В., Комков В.Г., Стариенко В.А. Разработка экономнолегированного сплава для восстановления бил молотковых мельниц // *Ученые заметки ТОГУ*. 2013. Т. 4. № 4. С. 1543 – 1549.
4. Чейлях Я.А., Чигарев В.В. Разработка состава экономнолегированной Fe–Cr–Mn наплавленной износостойкой стали с регулированием содержания и метастабильности аустенита // *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2011. № 22. С. 103 – 108.
5. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron // *Welding International*. 2008. Vol. 22. P. 796 – 800.
6. Kejžar R., Grum J. Hardfacing of wear-resistant deposits by MAG welding with a flux-cored wire having graphite in its filling // *Welding International*. 2005. Vol. 20. P. 961 – 976.
7. Li R., He D.Y., Zhou Z. etc. Wear and high temperature oxidation behavior of wire arc sprayed iron based coatings // *Surface Engineering*. 2014. Vol. 30. P. 784 – 790.
8. Ma H.R., Chen X.Y., Li J.W. etc. Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance // *Surface Engineering*. 2016. Vol. 46. P. 1 – 7.
9. Filippov M.A., Shumyakov V.I., Balin S.A. etc. Structure and wear resistance of deposited alloys based on metastable chromium – carbon austenite // *Welding International*. 2015. Vol. 29. P. 819 – 822.
10. Liu D.S., Liu R.P., Wei Y.H. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfacing alloy // *Materials Science and Technology*. 2014. Vol. 30. No. 3. P. 316 – 322.
11. Lim S.C., Gupta M., Goh Y.S., Seow K.C. Wear resistant WC – Co composite hard coatings // *Surface Engineering*. 1997. Vol. 13. No. 3. P. 247 – 250.
12. Zhuk Yu. Super-hard wear-resistant coating systems // *Materials Technology*. 1999. Vol. 14. P. 126 – 129.
13. Hardell J., Yousfi A., Lund M. etc. Abrasive wear behaviour of hardened high strength boron steel // *Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces*. 2014. Vol. 8. No. 2. P. 90 – 97.

14. Deng X.T., Fu T.L., Wang Z.D. etc. Epsilon carbide precipitation and wear behaviour of low alloy wear resistant steels // *Materials Science and Technology*. 2016. Vol. 32. No. 4. P. 320 – 327.
15. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б.Е. Патона. – М.: Металлургия, 1974 – 768 с.
16. Гусев А.И., Козырев Н.А., Кибко Н.В. и др. Изучение структуры и свойств металла, наплавленного порошковой проволокой системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – V – Co // *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2017. Т. 4. № 2. С. 113 – 119.
17. Гусев А.И., Кибко Н.В., Попова М.В. и др. Наплавка порошковыми проволоками систем C – Si – Mn – Mo – V – B и C – Si – Mn – Cr – Mo – V деталей горнорудного оборудования // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 4. С. 318 – 323.
18. Gusev A.I., Kibko, Kozyrev N.A. etc. A study on the properties of the deposited metal by flux cored wires 40GMFR and 40H3G2MF // *IOP Conf. Series: Materials N V Science and Engineering*. 2016. No. 150. P. 012033.
19. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 1999. – 576 с.
20. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 464 с.
21. Гмурман В.Е. Теория вероятности и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.
22. Пат. 2641590 МПК8B23 K35/36 В 23 K35/36. Порошковая проволока / Н.А. Козырев, А.И. Гусев, Г.В. Галевский и др.; заявл. 22.06.2016; опубл. 27.12.2017. Бюл. № 2.

Поступила 12 февраля 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 11, pp. 898–906.

DEVELOPMENT OF FLUX-CORED WIRE FOR SURFACING OF PARTS OPERATING UNDER CONDITIONS OF WEAR

**A.I. Gusev, A.A. Usol'tsev, N.A. Kozyrev, N.V. Kibko,
L.P. Bashchenko**

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Keywords: flux-cored wire, surfacing, wear resistance, hardness, surfacing materials.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-11-898-906

REFERENCES

- Abstract.** Powder wire for surfacing of abrasive-wearing products of Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo system (type A according to IIW classification) was developed and investigated. Studies in laboratory conditions were performed according to the following scheme: multilayer surfacing of the samples was carried out with preheating of plates up to 350 °C and subsequent slow cooling (after surfacing). Surfacing was made by ASAW-1250 welding tractor with manufactured cored wire in six layers on plates of 09G2S steel. Instead of amorphous carbon, carbon-fluorine-containing dust containing 21 – 46 % Al₂O₃; 18 – 27 % F; 8 – 15 % Na₂O; 0.4 – 6.0 % K₂O; 0.7 – 2.3 % CaO; 0.5 – 2.5 % SiO₂; 2.1 – 3.3 % Fe₂O₃; 12.5 – 30.2 % C_{gen}; 0.07 – 0.90 % MnO; 0.06 – 0.90 % MgO; 0.09 – 0.19 % S; 0.10 – 0.18 % P was introduced into the wire. The following powder materials were used as filler: iron powder PZhV1 as per GOST 9849 – 86, ferrosilicon powder FS 75 as per GOST 1415 – 93, high carbon ferrochrome powder F99A as per GOST 4757 – 91, carbon ferromanganese powder FMN 78(A) as per GOST 4755 – 91, PNK-1L5 nickel powder PNK-1L5 as per GOST 9722 – 97, ferromolybdenum powder FMo60 as per GOST 4759 – 91, ferrovanadium powder FV50U 0.6 as per GOST 27130 – 94, cobalt powder PC-1U as per GOST 9721 – 79, tungsten powder PVN as per PS 48-19-72 – 92. Studies of the deposited layer have shown that within the obtained limits, carbon, chromium, molybdenum, nickel, manganese and to a lesser extent vanadium simultaneously increase hardness of the deposited layer and reduce rate of wear of the samples. Increase in concentration of tungsten increases hardness of the deposited metal but reduces wear resistance. Low viscosity of matrix does not allow tungsten carbides to be kept on surface, as a result, wear occurs not according to the uniform surface abrasion scheme, but is reasoned by pitting high-strength carbide particles from the matrix, resulting in additional cracks formed in matrix, contributing to additional wear of matrix. Introduction of cobalt to the mixture composition does not have significant effect on hardness and abrasive wear of the deposited layer, which is associated with obtaining more viscous, but less solid matrix. In case of absence of solid particles of carbides embedded in matrix, the effect of introduction of cobalt is negative. According to the results of multivariate correlation analysis, dependences of hardness of the deposited layer and its wear resistance on mass fraction of elements included in flux-cored wires of the Fe–C–Si–Mn–Cr–Mo–Ni–V–Co system were determined.
1. Kirchgassner M., Badisch E., Franek F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact. *Wear Journal*. 2008, vol. 265, no. 5-6, pp. 772–779.
 2. Teplyashin M.V., Komkov V.G. Investigation of alloying elements effect on wear resistance in alloys intended for electrosag surfacing of hammer mills. *Uchenye zametki TOGU*. 2013, vol. 4, no. 4, pp. 1554–1561. (In Russ.).
 3. Teplyashin M.V., Komkov V.G., Starienko V.A. Development of economically alloyed alloy for the recovery of hammer mills. *Uchenye zametki TOGU*. 2013, vol. 4, no. 4, pp. 1543–1549. (In Russ.).
 4. Cheilyakh Ya.A., Chigarev V.V. Development of composition of economically alloyed Fe-Cr-Mn wear-resistant weld steel with regulation of content and metastability of austenite. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2011, no. 22, pp. 103–108. (In Russ.).
 5. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron. *Welding International*. 2008, vol. 22, pp. 796–800.
 6. Kejzar R., Grum J. Hardfacing of wear-resistant deposits by MAG welding with a flux-cored wire having graphite in its filling. *Welding International*. 2005, vol. 20, pp. 961–976.
 7. Li R., He D.Y., Zhou Z., Wang Z.J., Song X.Y. Wear and high temperature oxidation behavior of wire arc sprayed iron based coatings. *Surface Engineering*. 2014, vol. 30, pp. 784–790.
 8. Ma H.R., Chen X.Y., Li J.W., Chang C.T., Wang G., Li H., Wang X.M., Li R.W. Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance. *Surface Engineering*. 2016, vol. 46, pp. 1–7.
 9. Filippov M.A., Shumyakov V.I., Balin S.A., Zhilin A.S., Lechilo V.V., Rimer G.A. Structure and wear resistance of deposited alloys based on metastable chromium – carbon austenite. *Welding International*. 2015, vol. 29, pp. 819–822.
 10. Liu D.S., Liu R.P., Wei Y.H. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfacing alloy. *Materials Science and Technology*. 2014, vol. 30, no. 3, pp. 316–322.
 11. Lim S.C., Gupta M., Goh Y.S., Seow K.C. Wear resistant WC–Co composite hard coatings. *Surface Engineering*. 1997, vol. 13, no. 3, pp. 247–250.
 12. Zhuk Yu. Super-hard wear-resistant coating systems. *Materials Technology*. 1999, vol. 14, pp. 126–129.

13. Hardell J., Yousfi A., Lund M., Pelcastre L., Prakash B. Abrasive wear behaviour of hardened high strength boron steel. *Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces*. 2014, vol. 8, no. 2, pp. 90–97.
14. Deng X.T., Fu T.L., Wang Z.D., Misra R.D.K., Wang G.D. Epsilon carbide precipitation and wear behaviour of low alloy wear resistant steels. *Materials Science and Technology*. 2016, vol. 32, no. 4, pp. 320–327.
15. *Tekhnologiya elektricheskoi svarki metallov i splavov plavleniem* [Technology of electric welding of metals and alloys by melting]. Paton B.E. ed. Moscow: Metallurgiya, 1974, 768 p. (In Russ.).
16. Gusev A.I., Kozyrev N.A., Kibko N.V., Popova M.V., Kryukov R.E. Study of the structure and properties of metal deposited with flux-cored wire of Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – V – Co system. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii*. 2017, vol. 4, no. 2, pp. 113–119. (In Russ.).
17. Gusev A.I., Kibko N.V., Popova M.V., Kozyrev N.A., Osetkovskii I.V. Surfacing of details of mining equipment by powder wires of C – Si – Mn – Mo – V – B and C – Si – Mn – Cr – Mo – V systems. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 4, pp. 318–323. (In Russ.).
18. Gusev A.I., Kibko, Kozyrev N.A., Popova M.V., Osetkovsky I.V. A study on the properties of the deposited metal by flux cored wires 40GMFR and 40H3G2MF. *IOP Conf. Series: Materials N V Science and Engineering*. 2016, no. 150, pp. 012033.
19. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostei* [Probability theory]. Moscow: Vysshaya shkola, 1999, 576 p. (In Russ.).
20. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostei i ee inzhenernye prilozheniya* [Probability theory and its engineering applications]. Moscow: Izdatel'skii tsentr "Akademiya", 2003, 464 p. (In Russ.).
21. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola, 2003, 479 p. (In Russ.).
22. Kozyrev N.A., Gusev A.I., Galevskii G.V., Kryukov R.E., Osetkovskii I.V., Usol'tsev A.A., Kozyreva O.A. *Poroshkovaya provoloka* [Flux-cored wire]. Patent RF no. 2641590, MPK8B23 K35/36 V 23 K35/36. *Byulleten' izobretenii*. 2017, no. 2. (In Russ.).

Information about the authors:

A.I. Gusev, Postgraduate of the Chair "Material Science, Foundry and Welding Production" (allxx85@mail.ru)

A.A. Usol'tsev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production" (a.us@rambler.ru)

N.A. Kozyrev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production"

(kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru)

N.V. Kibko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production" (krivicheva_nv@mail.ru)

L.P. Bashchenko, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair "Thermal Power and Ecology", Executive Secretary of the Journal "Izvestiya Vuzov. Ferrous Metallurgy"

(luda.baschenko@gmail.com)

Received February 12, 2018