

УДК 519.237:669.018.25

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕННОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОАБРАЗИВНОГО ИЗНОСА*

Крюков Р.Е., к.т.н., доцент кафедры материаловедения, литейного
и сварочного производства (rek_nzrmk@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)

Бащенко Л.П., к.т.н., старший преподаватель кафедры теплоэнергетики
и экологии (luda.baschenko@gmail.com)

Осетковский И.В., аспирант кафедры материаловедения, литейного
и сварочного производства (iv.osetkovskiy@mail.ru)

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

Аннотация. Изучено влияние введения хрома в повышенной концентрации в качестве восстановителя при изготовлении порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo. Наплавку металла проводили на пластины стали марки Ст3 под флюсом АН-26С с предварительным подогревом основного металла до 250 – 300 °С. Порошковую проволоку диам. 5 мм, изготовленную на лабораторной машине, наплавляли на сварочном тракторе ASAW-1250 при следующих режимах: сила тока 420 – 520 А, напряжение 28 – 32 В, скорость сварки 7,2 – 9,0 м/ч. После наплавки металл охлаждали при комнатной температуре. Для изготовления образцов в качестве наполнителя (шихты) использовали соответствующие 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 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. Определено, что углерод, марганец, хром, молибден, никель и в незначительной мере ванадий в исследуемых пределах одновременно повышают твердость наплавленного слоя и уменьшают скорость износа образцов. 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 в матрице образуются новые трещины, способствующие дополнительному износу самой матрицы. По результатам проведенного многофакторного корреляционного анализа были определены зависимости твердости и износостойкости наплавленного слоя от массовой доли элементов, входящих в состав порошковых проволок системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo. Полученные зависимости могут быть использованы для прогнозирования твердости и износостойкости наплавленного слоя при изменении химического состава наплавленного металла.

Ключевые слова: порошковая проволока, наплавка, образцы, износостойкость, микроструктура, твердость, износ.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-6-423-430

ВВЕДЕНИЕ

Основным направлением повышения износостойкости деталей является разработка и изготовление специальных наплавочных экономнолегированных порошковых проволок [1 – 15].

В работах [16 – 19] изучали влияние изменения концентрации хрома и кремния в составе шихты порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo, легированной ванадием, на микроструктуру, износ

и твердость наплавленного металла. При этом в часть образцов вводили незначительное количество никеля и вольфрама.

В настоящей работе продолжено изучение влияния введения хрома в повышенной концентрации в порошковую проволоку системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo. В часть образцов также вводили незначительное количество никеля и вольфрама: в первую партию (образцы 1 – 4) вводили порошки хрома, никеля и ванадия; во вторую партию (образцы 5 – 8) – порошки хрома, никеля, ванадия и кобальта; в третьей партии (образцы 9 – 12) заменили основной легирующий эле-

* Работа выполнена в СибГИУ с использованием оборудования ЦКП «Материаловедение».

мент (хром) на вольфрам; в четвертой партии (образцы 13 – 16) в системе при постоянной добавке никеля изменяли содержание молибдена.

Наплавку металла производили на пластины марки Ст3 под флюсом АН-26С с предварительным подогревом основного металла до 250 – 300 °С. Порошковую проволоку диаметром 5 мм, изготовленную на лабораторной машине, наплавляли на сварочном тракторе ASAW-1250 при следующих режимах: $I = 420 \div 520$ А, $U = 28 \div 32$ В, $V_{\text{св}} = 7,2 \div 9,0$ м/час. После наплавки металл охлаждался при комнатной температуре.

В качестве наполнителя (шихты) использовали соответствующие 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-1Л15 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.

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

ми ГОСТ 9013 – 59. Металлографическое исследование 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. 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. Определение длины игл мартенсита осуществляли с помощью пакета прикладных программ для металлографических исследований SiamPhotolab 700. Исследование продольных образцов наплавленного слоя на наличие неметаллических включений проводили по ГОСТ 1778 – 70. Полированную поверхность изучали при увеличении 100 с помощью металлографического микроскопа ЛабoМет-1И.

Износ наплавленного слоя опытных образцов определяли путем проведения испытаний на машине 2070 СМТ-1 по схеме диск – колодка со следующими параметрами: частота вращения вала по образцу 100 мин⁻¹; момент трения 3 Н·м, нагрузка диска на образец 600 Н.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Металлографические исследования показали (табл. 2, рис. 1), что микроструктура слоя, наплавленного порошковой проволокой системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo и микролегированной ванадием и кобаль-

Т а б л и ц а 1

Химический состав наплавленного металла

Table 1. Chemical composition of deposited metal

Образец	Содержание элемента, % (по массе)											
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Co	W	Cu	S	P
1	0,24	0,19	0,93	1,83	0,14	0,69	0,60	0,002	0,020	0,07	0,036	0,017
2	0,25	0,27	0,96	1,65	0,33	0,68	0,60	0,003	0,080	0,09	0,033	0,010
3	0,29	0,28	0,93	1,67	0,54	0,57	0,58	0,002	0,020	0,06	0,029	0,014
4	0,25	0,15	0,92	1,65	0,65	0,60	0,59	0,002	0,050	0,06	0,034	0,012
5	0,23	0,12	0,85	1,45	0,53	0,51	0,68	0,080	0,001	0,05	0,033	0,017
6	0,21	0,23	0,89	1,45	0,54	0,55	0,54	0,030	0,001	0,07	0,031	0,015
7	0,17	0,18	0,85	1,40	0,52	0,54	0,63	0,050	0,001	0,06	0,029	0,016
8	0,17	0,28	0,91	1,32	0,45	0,46	0,59	0,060	0,001	0,06	0,032	0,015
9	0,17	0,19	0,80	0,09	0,56	0,25	0,56	0,006	2,250	0,12	0,047	0,016
10	0,12	0,20	0,79	0,07	0,53	0,08	0,51	0,001	2,170	0,09	0,053	0,025
11	0,14	0,18	0,65	0,06	0,49	0,64	0,45	0,002	1,970	0,09	0,033	0,020
12	0,12	0,22	0,70	0,07	0,50	0,54	0,47	0,001	2,110	0,10	0,054	0,027
13	0,22	0,18	0,64	1,59	0,46	0,08	0,48	0,001	0,003	0,09	0,031	0,017
14	0,14	0,23	0,73	1,73	0,53	0,23	0,55	0,001	0,001	0,09	0,033	0,017
15	0,16	0,20	0,84	1,70	0,58	0,52	0,63	0,001	0,001	0,08	0,035	0,016
16	0,24	0,19	0,93	1,83	0,14	0,69	0,60	0,002	0,020	0,07	0,036	0,017

Структура, величина зерна, игл мартенсита, твердость и скорость истирания наплавленных образцов

Table 2. Structure, grain size, martensite needles, hardness and abrasion rate of the deposited samples

Образец	Структура	Размер игл, мкм	Величина зерна аустенита	HRC	Скорость истирания, г/об.
1	Мартенсит	3 – 10	6, 5	41	$2,90 \cdot 10^{-5}$
2	Мартенсит	3 – 8	6, 5	40	$3,70 \cdot 10^{-5}$
3	Мартенсит	4 – 8	5, 6	40	$3,58 \cdot 10^{-5}$
4	Мартенсит	2 – 8	5, 6	41	$3,59 \cdot 10^{-5}$
5	Мартенсит	3 – 5	6, 5	25	$13,60 \cdot 10^{-5}$
6	Мартенсит	3 – 5	6	21	$16,50 \cdot 10^{-5}$
7	Мартенсит	3 – 5	5, 6	21	$11,50 \cdot 10^{-5}$
8	Мартенсит	2 – 5	5, 6	21	$8,88 \cdot 10^{-5}$
9	Феррито-перлитная	–	4, 5	17	$11,50 \cdot 10^{-5}$
10	Феррито-перлитная	–	4, 5	16	$3,96 \cdot 10^{-5}$
11	Феррито-перлитная	–	4	16	$17,00 \cdot 10^{-5}$
12	Феррито-перлитная	–	4	16	$18,60 \cdot 10^{-5}$
13	Мартенсит	2 – 5	6, 5	20	$15,00 \cdot 10^{-5}$
14	Мартенсит	2 – 4	6	25	$13,40 \cdot 10^{-5}$
15	Мартенсит	2 – 5	6	29	$15,00 \cdot 10^{-5}$
16	Мартенсит	2 – 4	6	28	$9,20 \cdot 10^{-5}$

том, 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. 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 (табл. 2, рис. 2, а – е).

Введение в состав шихты кобальта (рис. 2, ж) противоречиво. Кобальт повышает и твердость, и износ. При увеличении концентрации вольфрама (рис. 2, з) снижается твердость и увеличивается износ. Это можно объяснить только структурой материала или матрицей. В случае отсутствия твердых частиц карбидов, вмонтированных в матрицу, эффект от введения кобальта отрицательный. При этом влияние вольфрама на твердость наплавленного слоя и скорость износа образцов, в первую очередь, связано со структурой металлической матрицы, причем замена мартенситной структуры в наплавленном слое на феррито-перлитную также не оказало большого положительного влияния на износостойкость. По результатам испытаний на износ и твердость образцов данной структуры было выясне-

но, что использование вольфрама в качестве основного легирующего элемента при абразивном изнашивании в качественном и количественном отношении уступает хрому. В рассматриваемом случае низкая вязкость матрицы не позволяет удерживать на поверхности карбиды вольфрама, в результате износ осуществляется не по схеме равномерного истирания поверхности, а по схеме выкрошивания частиц карбидов из матрицы. В матрице образуются трещины, способствующие дополнительному износу самой матрицы.

Уровень загрязненности неметаллическими включениями не оказывает значительного влияния на износ образцов (табл. 3).

Раздельное влияние химических элементов наплавки на скорость износа и твердость наплавленного слоя, как правило, показывает тенденцию влияния, но не всегда учитывает их совместное влияние на указанные свойства. Для оценки совместного влияния химического состава порошковых проволок на скорость износа и твердость наплавленного слоя использовали математико-статистическими методы, которые позволяют выявить закономерности изменения результирующего показателя в зависимости от поведения различных факторов по методике, изложенной в работе [20].

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

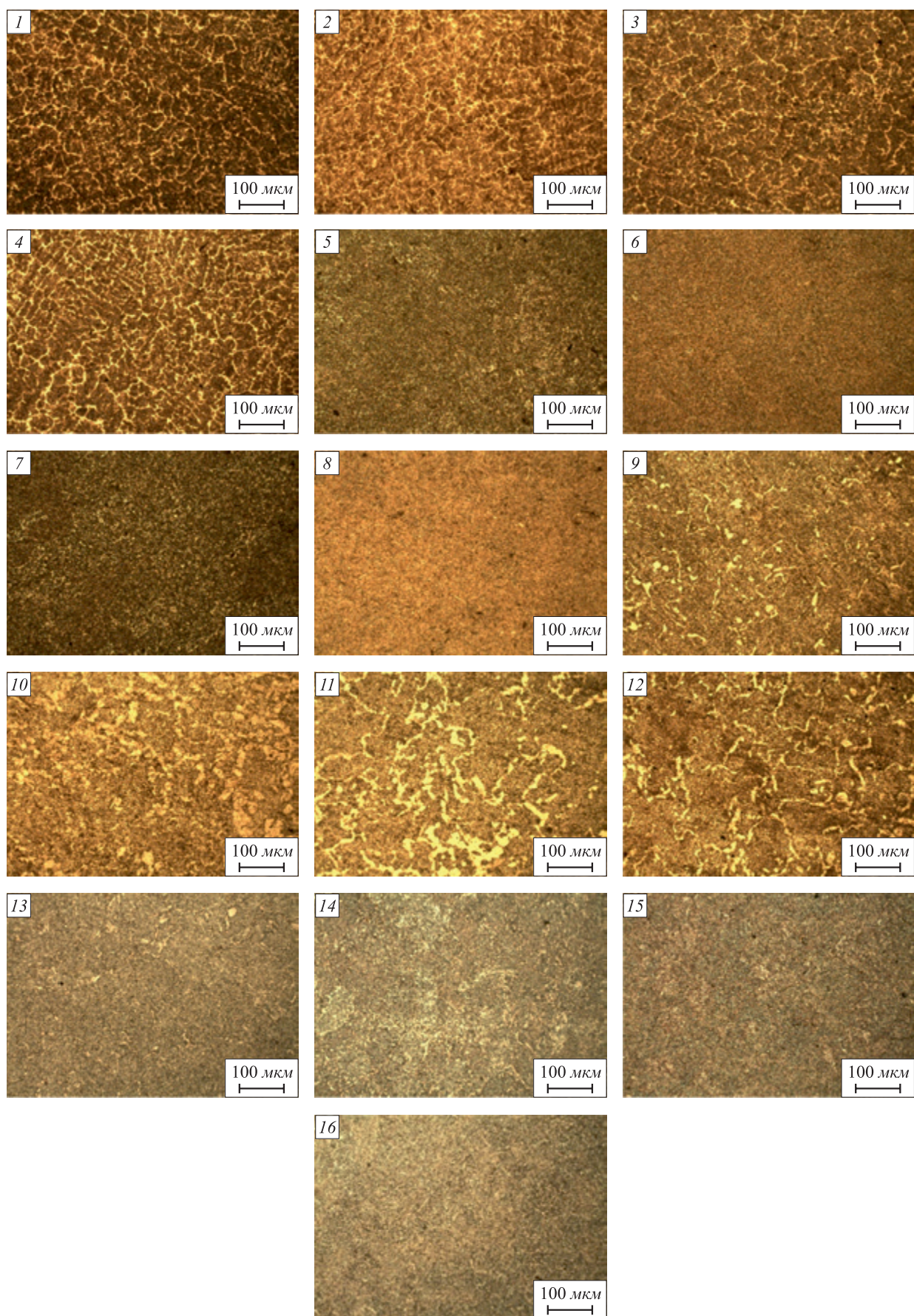


Рис. 1. Микроструктура наплавленного слоя образцов

Fig. 1. Microstructure of deposited layer of the samples

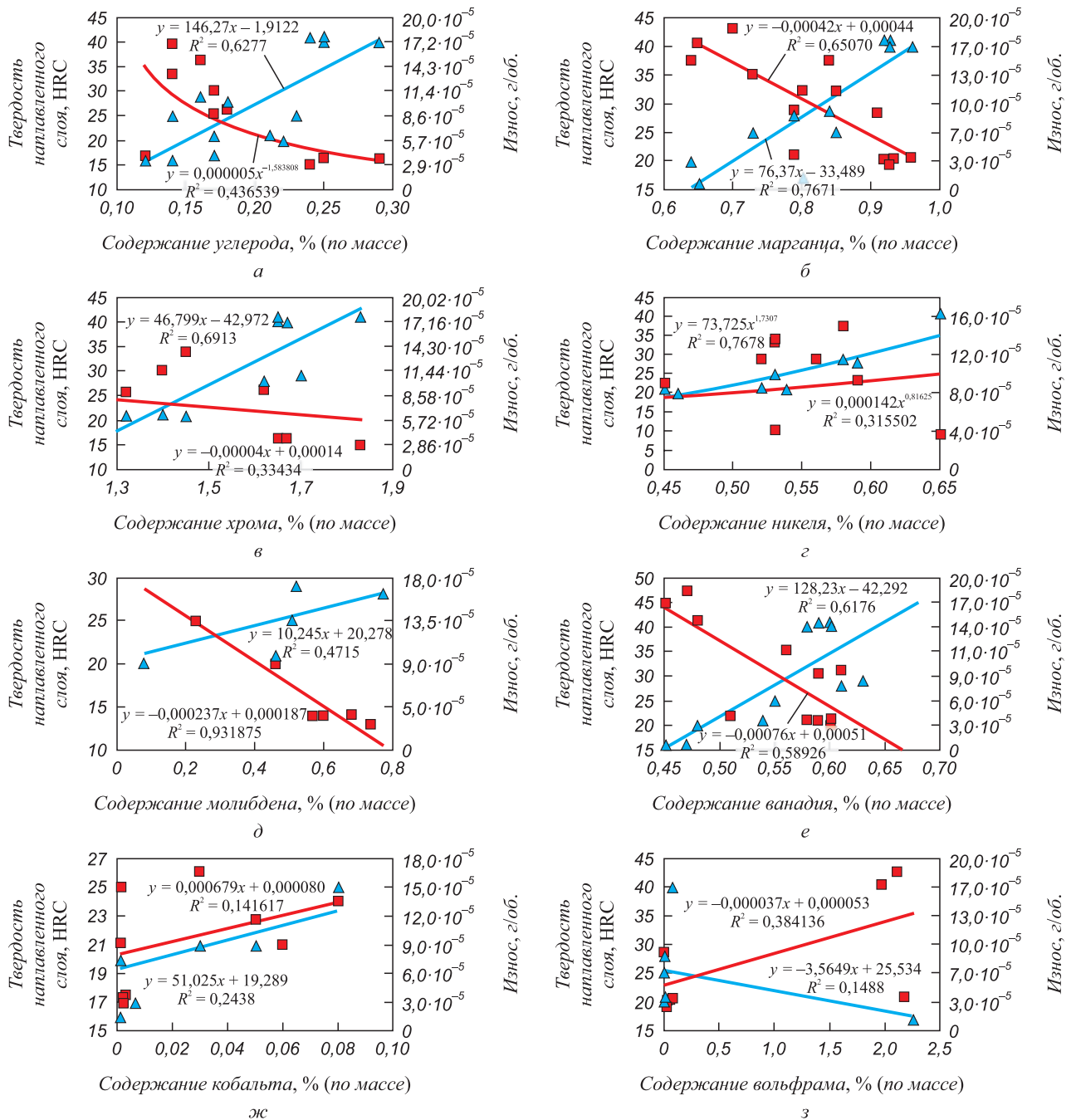


Рис. 2. Зависимость твердости наплавленного слоя металла от содержания углерода (а), марганца (б), хрома (в), никеля (г), молибдена (д), ванадия (е), кобальта (ж), вольфрама (з):
■ – твердость; ▲ – износ

Fig. 2. Dependence of hardness of the deposited metal layer on content of carbon (a), manganese (б), chromium (в), nickel (г), molybdenum (д), vanadium (е), cobalt (ж), tungsten (з):
■ – hardness; ▲ – wear

соответствие закону нормального распределения. Далее была 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:

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

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

В результате проведенного анализа получены зависимости твердости наплавленного слоя и его изно-

Т а б л и ц а 3

Загрязненность неметаллическими включениями

Table 3. Contamination by non-metallic inclusions

Образец	Силикаты	Оксиды точечные
1	1б, 2б, 3а	1а
2	2б, 2а, 3а	1а
3	2б, 3а	1а
4	2б, 3а	1а
5	2б, 2а, 3а	1а
6	1б, 2б, 3а	1а
7	2б, 3а	1а
8	2б, 3а (1б)	1а
9	1б, 2б, 3а	1а
10	1б, 2б, 2а	1а, 2а
11	1б, 2б, 3а	1а
12	1б, 2б, 3а	1а
13	1б, 2б	1а, 2а
14	2б, 1б	1а
15	1б, 2б	1а
16	2б, 1б	1а, 2а

состоятельности от массовой доли элементов, входящих в состав порошковых проволок системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Mo–Ni–V–Co.

Твердость наплавленного слоя:

$$\begin{aligned} \text{HRC} = & 4,82 + 45,39\text{C} + 30,14\text{Si} - 29,47\text{Mn} + \\ & + 17,89\text{Cr} - 8,00\text{Ni} + 12,095\text{Mo} + 46,45\text{V} - \\ & - 164,74\text{Co} + 11,96\text{W} - 306,3\text{Cu} + 505,72\text{S} - \\ & - 996,48\text{P} \text{ (ошибка аппроксимации составляет 0,34 \%)} \end{aligned}$$

Скорость износа наплавленного слоя образцов:

$$\begin{aligned} \text{И} = & 0,000237 - 0,00035\text{C} + 0,0000556\text{Si} - \\ & - 0,00038\text{Mn} + 0,000245\text{Cr} + 0,000168\text{Ni} + \\ & + 0,000141\text{Mo} - 0,00072\text{V} + 0,00281\text{Co} + \\ & + 0,000141\text{W} + 0,00101\text{Cu} + 0,00166\text{S} - 0,00351\text{P} \\ & \text{(ошибка аппроксимации составляет 3,21 \%)} \end{aligned}$$

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

Выводы

Углерод, марганец, хром, молибден, никель и в незначительной мере ванадий в исследуемых пределах одновременно повышают твердость наплавленного слоя и уменьшают скорость износа образцов.

Низкая вязкость матрицы не позволяет удерживать на поверхности карбиды вольфрама, в результате износ осуществляется не по схеме равномерного истирания поверхности, а по схеме выкрошивания высокопрочных частиц карбидов из матрицы. В матрице образуются новые трещины, способствующие дополнительному износу самой матрицы.

В результате проведенного многофакторного корреляционного анализа определены зависимости твердости и износостойкости наплавленного слоя 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 и износостойкости наплавленного слоя при изменении химического состава наплавленного металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андрущенко М.И., Куликовский Р.А., Бережный С.П., Сопильняк О.Б. Способность к самоупрочнению поверхности трения и износостойкость наплавленного металла в условиях абразивного изнашивания // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. 2009. № 1. С. 30 – 37.
2. Kirchgaßner M., Badisch E., Franek F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact // Wear. 2008. Vol. 265. No. 5-6. P. 772 – 779.
3. Klimpel A., Dobrzanski L.A., Janicki D., Lisiecki A. Abrasion resistance of GMA metal cored wires surfaced deposits // Materials Processing Technology. 2005. Vol. 164-165. P. 1056 – 1061.
4. Wang Q., Li X. Effects of Nb, V, and W on microstructure and abrasion resistance of Fe – Cr – C hardfacing alloys // Welding Journal (Miami, Fla). 2010. Vol. 89. No. 7. P. 133 – 139.
5. Filippov M.A., Shumyakov V.I., Balin S.A., Zhilin A.S., Lehchilo V.V., Rimer G.A. Structure and wear resistance of deposited alloys based on metastable chromium–carbon austenite // Welding International. 2015. Vol. 29. No. 10. P. 819 – 822.
6. 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.
7. 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.
8. Deng X.T., Fu T.L., Wang Z.D., Misra R.D.K., Wang G.D. Epsilon carbide precipitation and wear behavior of low alloy wear resistant steels // Materials Science and Technology. 2016. Vol. 32. No. 4. P. 320 – 327.
9. Mendez P.F., Barnes N., Bell K., Borle S.D., Gajapathi S.S., Guest S.D., Izadi H., Gol A.K., Wood G. Welding processes for wear resistant overlays // Journal of Manufacturing Processes. 2014. Vol. 16. No. 1. P. 4 – 25.
10. Тепляшин М.В., Комков В.Г., Стариенко В.А. Разработка экономнолегированного сплава для восстановления бил молотковых мельниц // Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ». 2013. Т. 4. № 4. С. 1543 – 1549.
11. Коробов Ю.С., Филиппов М.А., Макаров А.В., Верхорубов В.С., Невежин С.В., Кашфуллин А.М. Стойкость наплавленных покрытий со структурой метастабильного аустенита против абразивного и адгезионного изнашивания // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17. № 2. С. 224 – 230.
12. Нефедьев С.П., Дёма Р.Р., Котенко Д.А. Абразивная и ударно-абразивная износостойкость твердых наплавленных покрытий // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2015. Т. 15. № 1. С. 103 – 106.

13. Малинов В.Л. Исследование методом регрессионного анализа зависимостей износостойкости в условиях абразивного и ударно-абразивного изнашивания от химического состава металла на Fe – Cr – Mn – V – C основе // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2011. № 2 (23). С. 107 – 112.
14. Юрченко А.Н., Панов Д.О., Симонов Ю.Н. Изменение микроstructures экономнолегированной стали в зависимости от скорости непрерывного охлаждения и температуры изотермической выдержки // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2017. Т. 19. № 1. С. 98 – 110.
15. Ma H.R., Chen X.Y., Li J.W., Chang C.T., G. Wang, Li H., Wang X.M., Li R.W. Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance // Surface Engineering. 2017. Vol. 33. No. 1. P. 1 – 7.
16. Гусев А.И., Кибко Н.В., Попова М.В., Козырев Н.А., Осетковский И.В. Наплавка порошковыми проволоками 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.
17. Гусев А.И., Усольцев А.А., Козырев Н.А., Кибко Н.В., Башенко Л.П. Разработка порошковой проволоки для наплавки деталей, работающих в условиях износа // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 11. С. 898 – 906.
18. Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Уманский А.А., Соколов П.Д. Разработка новых порошковых проволок для наплавки. Порошковые проволоки с использованием углеродфторсодержащих материалов для ремонта прокатных валков // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2018. Вып. 1 (1417). С. 77 – 86.
19. Osetkovsky I.V., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Usoltsev A.A., Gusev A.I. Development of a wear-resistant flux cored wire of Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo–V system for deposit welding of mining equipment parts // International Scientific and Research Conference on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (KTDUMR2017), 6–9 June 2017, Novokuznetsk, Russian Federation. 2017. Vol. 84. P. 1 – 7.
20. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 464 с.

Поступила в редакцию 11 декабря 2018 г.

После доработки 1 марта 2019 г.

Принята к публикации 11 марта 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. Vol. 62. No. 6, pp. 423–430.

STUDY OF THE OPERATING IN CONDITIONS OF ABRASIVE WEAR DEPOSITED LAYER OBTAINED WITH THE USE OF NEW FLUX-CORED WIRES

R.E. Kryukov, A.A. Usol'tsev, N.A. Kozyrev, L.P. Bashchenko, I.V. Osetkovskii

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. The effect of introduction of chromium with increased concentration as a reducing agent was studied at the manufacture of flux cored wire of the Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo system. Metal welding deposition was carried out on the plates of St3 steel with the help of AN-26C flux with preliminary heating of the base metal to 250 – 300 °C. Flux cored wire of 5 mm in diameter, made on a laboratory machine, was deposited on ASAW-1250 welding tractor in the following modes: current 420 – 520 A, voltage 28 – 32 V, welding speed 7.2 – 9.0 m/h. After it the metal was cooled at room temperature. For manufacture of the samples, the corresponding powdery materials were used as fillers (charge): iron powder PZhV1 according to GOST (State Standards) 9849 – 86, FS 75 ferrosilicon powder according to GOST 1415 – 93, FKh900A high carbon ferrochrome powder according to GOST 4757 – 91, FMn 78(A) carbonaceous ferromanganese powder according to GOST 4755 – 91, PNK-1L5 nickel powder according to GOST 9722 – 97, FMo60 ferromolybdenum powder according to GOST 4759 – 91, FV50U 0.6 ferrovanadium powder according to GOST 27130 – 94, PC-IU cobalt powder according to GOST 9721 – 79 and tungsten powder PVN TU 48-19-72-92. It was determined that carbon, manganese, chromium, molybdenum, nickel and, to a small extent, vanadium, within the limits studied, simultaneously increase hardness of the deposited layer and decrease wear rate of the samples. It is shown that the low viscosity of the matrix does not allow tungsten carbides to be kept on the surface, as a result of which the wear is carried out not according to the uniform abrasion of the surface, but according to the scheme of spalling high-strength carbides particles from the matrix. As a result, new cracks are formed in the matrix, contributing to its additional wear. According to the results of the multifactor correlation analysis, dependences of hardness and wear resistance of the deposited layer on mass fraction of the elements included in the flux-cored wires of the Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo system were determined. The obtained dependences can be used to

predict hardness and wear resistance of the deposited layer with a change in the chemical composition of the weld metal.

Keywords: flux cored wire, weld deposit, samples, wear-resistance, microstructure, hardness, wear.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-6-423-430

REFERENCES

1. Andrushchenko M.I., Kulikovskii R.A., Berezhnyi S.P., Sopil'nyak O.B. Ability to self-hardening of the friction surface and wear resistance of the deposited metal in abrasive wear conditions. *Novye materialy i tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii*. 2009, no. 1, pp. 30–37. (In Russ.).
2. Kirchgaßner M., Badisch E., Franek F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact. *Wear*. 2008, vol. 265, no. 5–6, pp. 772–779.
3. Klimpel A., Dobrzanski L.A., Janicki D., Lisiecki A. Abrasion resistance of GMA metal cored wires surfaced deposits. *Materials Processing Technology*. 2005, vol. 164–165, pp. 1056–1061.
4. Wang Q., Li X. Effects of Nb, V, and W on microstructure and abrasion resistance of Fe – Cr – C hardfacing alloys. *Welding Journal (Miami, Fla)*. 2010, vol. 89, no. 7, pp. 133–139.
5. Filippov M.A., Shumyakov V.I., Balin S.A., Zhilin A.S., Lehchilo V.V., Rimer G.A. Structure and wear resistance of deposited alloys based on metastable chromium-carbon austenite. *Welding International*. 2015, vol. 29, no. 10, pp. 819–822.
6. 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.
7. 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.
8. Deng X.T., Fu T.L., Wang Z.D., Misra R.D.K., Wang G.D. Epsilon carbide precipitation and wear behavior of low alloy wear resistant steels. *Materials Science and Technology*. 2016, vol. 32, no. 4, pp. 320–327.
9. Mendez P.F., Barnes N., Bell K., Borle S.D., Gajapathi S.S., Guest S.D., Izadi H., Gol A.K., Wood G. Welding processes for

- wear resistant overlays. *Journal of Manufacturing Processes*. 2014, vol. 16, no. 1, pp. 4–25.
10. Teplyashin M.V., Komkov V.G., Starienko V.A. Development of a sparingly alloyed alloy for the recovery of hammer mills. *Uchenye zametki TOGU*. 2013, vol. 4, no. 4, pp. 1543–1549. (In Russ.).
 11. Korobov Yu.S., Filippov M.A., Makarov A.V., Verkhorubov V.S., Nevezhin S.V., Kashfullin A.M. Resistance of deposited coatings with the structure of metastable austenite against abrasive and adhesive wear. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2015, vol. 17, no. 2, pp. 224–230. (In Russ.).
 12. Nefed'ev S.P., Dema R.R., Kotenko D.A. Abrasive and shock-abrasive wear resistance of hard welded coatings. *Vestnik YuUrGU. Seriya Metallurgiya*. 2015, vol. 15, no. 1, pp. 103–106. (In Russ.).
 13. Malinov V.L. Regression analysis of the dependences of wear resistance on chemical composition of Fe – Cr – Mn – V – C based metal in conditions of abrasive and impact-abrasive wear. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya Tekhnicheskie nauki*. 2011, vol. 23, no. 2, pp. 107–112. (In Russ.).
 14. Yurchenko A.N., Panov D.O., Simonov Yu.N. Change in microstructure of the sparingly alloyed steel depending on the rate of continuous cooling and isothermal holding temperature. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie*. 2017, vol. 19, no. 1, pp. 98–110. (In Russ.).
 15. Ma H.R., Chen X.Y., Li J.W., Chang C.T., G. Wang, Li H., Wang X.M., Li. R.W. Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance. *Surface Engineering*. 2017, vol. 33, no. 1, pp. 1–7.
 16. 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. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 4, pp. 318–323. (In Russ.).
 17. Gusev A.I., Usoltsev A.A., Kozyrev N.A., Kibko N.V., Bashchenko L.P. Development of flux-cored wire for surfacing of parts operating under conditions of wear. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 11, pp. 898–906. (In Russ.).
 18. Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Usoltsev A.A., Umanskii A.A., Sokolov P.D. Development of new cored wires for surfacing. Flux cored wires using carbon fluoride materials for rolling mill repair. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2018, no. 1 (1417), pp. 77–86. (In Russ.).
 19. Osetkovskiy I.V., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Usoltsev A.A., Gusev A.I. Development of a wear-resistant flux cored wire of Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V system for deposit welding of mining equipment parts. *Int. Sci. and Research Conf. on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (KTD-MUR2017)*, 6–9 June 2017, Novokuznetsk, Russian Federation. 2017, vol. 84, pp. 1–7.
 20. Ventsel' 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.
- Acknowledgements.** The work was carried out in SibSIU using the equipment of the Center for Collective Use "Materials Science".
- Information about the authors:**
- R.E. Kryukov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production" (rek_nzrmk@mail.ru)
- A.A. Usoltsev**, 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)
- L.P. Bashchenko**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair "Thermal Power and Ecology" (luda.baschenko@gmail.com)
- I.V. Osetkovskii**, Postgraduate of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production" (iv.osetkovskiy@mail.ru)

Received December 11, 2018

Revised March 1, 2019

Accepted March 11, 2019