

А.А. Усольцев, Н.В. Кибко, Н.А. Козырев, Л.П. Бащенко, А.И. Гусев

Сибирский государственный индустриальный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА, НАПЛАВЛЕННОГО ПОРОШКОВЫМИ ПРОВОЛОКАМИ СИСТЕМЫ Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo

Износ рабочих поверхностей механизмов машин горного оборудования в результате абразивного и ударного изнашивания при эксплуатации вызывает необходимость проведения восстановления. Наиболее перспективным процессом является восстановление с использованием наплавки порошковой проволокой. Для этого в нашей стране и за рубежом ведется разработка и изготовление специальных наплавочных материалов и порошковых проволок [1 – 9]. Благодаря оптимально подобранному способу легирования наплавленные покрытия обладают высокими твердостью, абразивной и ударно-абразивной износостойкостью. 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 [10]. В настоящей работе продолжены начатые ранее исследования по разработке новых составов порошковых проволок для наплавки на изделия, работающие в условиях абразивного износа в горнорудной промышленности [11 – 14].

Изготовление проволоки проводили на лабораторной машине. Диаметр изготовленной проволоки 5 мм, оболочка выполнена из ленты стали марки Ст3. В качестве наполнителя 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-1Л5 по ГОСТ 9722 – 97, порошок ферромolibдена марки ФМо60 по ГОСТ 4759 – 91, порошок кобальта ПК-1У по ГОСТ 9721 – 79, порошок вольфрама ПВ-1 ТУ 14-22-143 – 2000. В качестве углеродсодержащего компонента использовали пыль газоочистки алюминиевого производства следующего химического состава: 21 – 46,23 % Al₂O₃; 18 – 27 % F; 8 – 15 % Na₂O; 0,4 – 6,0 % K₂O; 0,7 – 2,3 % CaO; 0,5 – 2,48 % SiO₂; 2,1 – 3,27 % Fe₂O₃; 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 (по массе). Состав шихты порошковых проволок представлен в табл. 1.

Наплавку изготовленной проволокой проводили под флюсом АН-26С на пластины из стали марки Ст3 в пять слоев при помощи сварочного трактора АСАW-1250. Режим наплавки: $I = 450$ А, $U = 30$ В, $V = 10$ см/мин.

Образцы для проведения исследований макро- и микроструктуры, твердости, износостойкости были подготовлены по методике, включающей вырезку образцов на отрезном станке KKS 315L, шлифование на плоскошлифовальном станке ЗД725, полирование на полировальном станке FROMMIA 835 SE.

Т а б л и ц а 1

Состав шихты порошковых проволок

Порошкообразный материал	Содержание, %, в образце		
	1Г22	2Г23	3Г24
Ферросилиций ФС 75	2,50	2,50	2,50
Ферромарганец ФМн	3,13	3,13	3,13
Феррохром ФХ900А	15,64	15,63	15,64
Никель ПНК-1Л5	0,94	0,94	0,94
Ферромolibден ФМо60	1,56	1,56	1,56
Кобальт ПК-1У	0	0	0,94
Вольфрам ПВ-1	0	18,76	0
Углеродсодержащий компонент	6,45	6,44	6,45
Порошок железа марки ПЖВ1	69,77	51,03	68,84

Химический состав наплавленных слоев определяли по ГОСТ 10543 – 98 рентгенофлюоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71. Химический состав наплавленных слоев, полученных с использованием порошковых проволок, приведен в табл. 2. Твердость наплавленных слоев измеряли с помощью твердомера МЕТ-ДУ.

Испытания на износостойкость проводили по методу, основанном на измерении массы образца до и после износа. Износ образцов осуществляли на машине 2070 СМТ-1, характеристики которой: погрешность измерителя частоты вращения вала нижнего образца $\pm 3\%$, предел допускаемого значения среднего квадратичного отклонения случайной составляющей приведенной погрешности измерителя момента трения в режиме статического нагружения 1% . Испытания проводили при режиме: нагрузка 30 мА ($78,4\text{ Н}$), частота 20 об/мин , нагружение образцов проводили с помощью пружинного механизма, частоту вращения измеряли с помощью тахогенератора на валу двигателя, а число оборотов – с помощью бесконтактного датчика. В процессе испытания образец взаимодействовал с колодкой, изготовленной из стали типа P18. В табл. 2 приведены результаты испытаний.

Металлографический анализ верхнего наплавленного слоя проводили с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 с автоматическим структурным анализатором «EPIQUANT» в светлом поле (диапазон увеличений $100 - 1000$) после травления в спиртовом растворе азотной кислоты. Величину зерна определяли по ГОСТ 5639 – 82 при увеличении 100 методом сравнения с эталонными шкалами. Определение размера игл мартенсита и балла мартенсита проводили согласно ГОСТ 8233 – 56 (увеличение 1000), используя программное обеспечение микроскопа, пакет прикладных программ для металлографических исследований SiamPhotolab 700 методом сравнения с эталонными шкалами. Исследования продольных образцов наплавленного слоя на наличие неметаллических включений осуществляли в соответствии с ГОСТ 1778 – 70 (увеличение 100) методом сравнения с эталонными шкалами.

Металлографические исследования показали, что микроструктура слоев, наплавленных порошковыми проволоками, представляет собой мелко- и среднеигльчатый мартенсит и тонкие прослойки δ -феррита, располагающиеся по границам бывших зерен аустенита. Структура слоев, наплавленных порошковыми

проволоками, представлена на рис. 1, характеристики структуры приведены в табл. 3.

Установлено, что введение в состав шихты проволоки порошков вольфрама и кобальта способствует незначительному измельчению игл мартенсита и уменьшению величины первичного зерна аустенита.

В результате оценки загрязненности наплавленного слоя неметаллическими включениями установлено присутствие оксидных неметаллических включений, в частности силикатов недеформирующихся и оксидов точечных (табл. 3). Показано, что изменение химического состава практически не оказывает влияния на степень загрязненности наплавленного металла неметаллическими включениями. Для всех наплавленных слоев отмечена незначительная загрязненность оксидами точечными и силикатами недеформирующимися.

При исследовании влияния использования вольфрама и кобальта на свойства наплавленного слоя установлено, что введение вольфрама в состав шихты проволоки повышает твердость наплавленного металла, однако при этом снижается износостойкость. Это, по-видимому, 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 выкрашивания высокопрочных частиц карбидов из матрицы. В результате в матрице образуются дополнительные трещины, способствующие ускорению ее износа.

Введение кобальта в состав шихты проволоки 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.

Анализ результатов определения твердости наплавленных слоев и испытания на износостойкость показали, что преобладающее влияние на исследуемые характеристики оказывают содержания хрома (рис. 2) и вольфрама (рис. 3).

Статистическая обработка полученных результатов позволила получить следующие регрессионные зависимости HRC и потери масс при износе (V – скорости износа):

$$\text{HRC} = 50,188 - 2,136\text{Cr} + 1,381\text{W} \\ (R^2 = 0,989);$$

Т а б л и ц а 2

Химический состав, износ и твердость наплавленных слоев

Образец	Содержание, %, элементов														HRC	Износ, г/об
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	B	W	Co	Al	Cu	Ti	S	P		
1Г22	0,23	0,65	0,94	3,86	0,27	0,41	0,001	0,04	0,014	0,04	0,07	0,001	0,037	0,025	41 – 43	0,000033
2Г23	0,28	0,61	0,93	3,57	0,27	0,39	0,001	4,66	0,02	0,02	0,07	0,001	0,044	0,023	48 – 50	0,000065
3Г24	0,20	0,78	1,01	4,12	0,26	0,37	0,001	0,08	0,19	0,03	0,07	0,001	0,042	0,019	40 – 43	0,000030

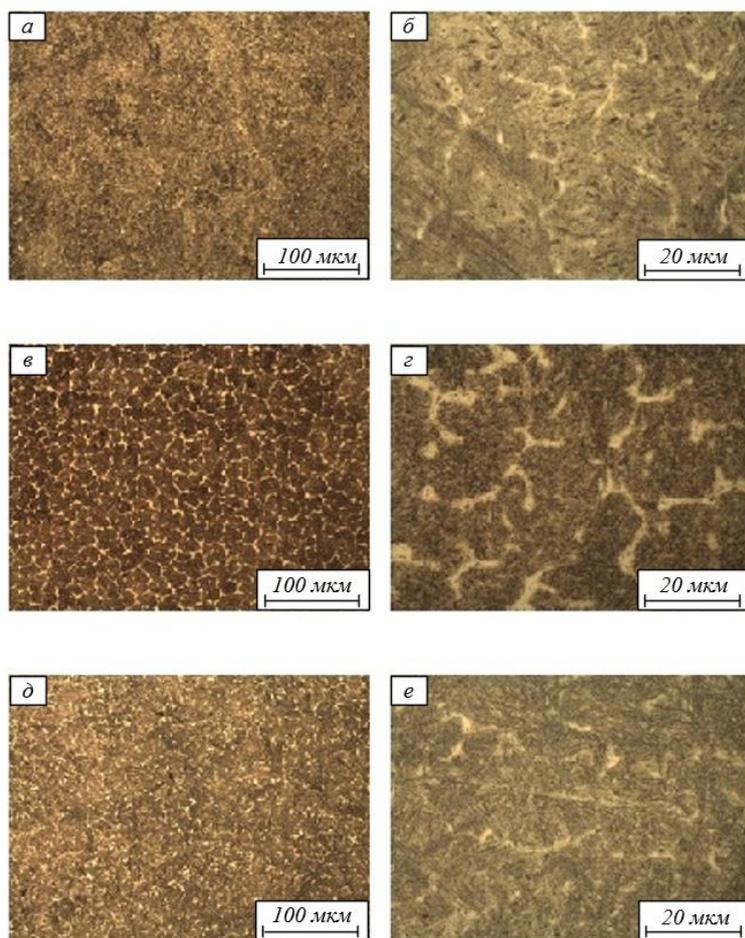


Рис. 1. Микроструктура слоев, наплавленных исследуемыми порошковыми проволоками
a, б – образец 1Г22; *в, г* – образец 2Г23; *д, е* – образец 3Г24

$$V = 0,0000809 - 0,000012Cr + 0,000006,14W$$

$$(R^2 = 0,998).$$

Выводы. Проведен металлографический анализ наплавленных слоев, полученных при использовании порошковых проволок системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo с дополнительным введением в состав кобальта и вольфрама. Установлено, что структурными составляющими всех наплавленных слоев являются мелко- и среднеигльчатый мартенсит, тонкие

прослойки δ-феррита, располагающегося по границам бывших зерен аустенита. Введение в состав шихты проволоки порошков вольфрама и кобальта способствует незначительному измельчению игл мартенсита и уменьшению величины первичного зерна аустенита. Проведена оценка загрязненности наплавленных слоев неметаллическими включениями. Установлено присутствие в наплавленном металле силикатов недеформирующихся и оксидов точечных. Введение в состав шихты проволоки вольфра-

Т а б л и ц а 3

Характеристики неметаллических включений и структуры исследуемых образцов

Образец	Загрязненность неметаллическими включениями, балл		Величина зерна аустенита, номер	Размер игл мартенсита, мкм
	силикаты недеформирующиеся (хрупкие)	оксиды точечные		
1Г22	1б, 2б	1 а	6	6 – 10
2Г23	1б, 2б	1 а	6, 7	4 – 8
3Г24	2б, 2а	1 а	6, 7	3 – 9

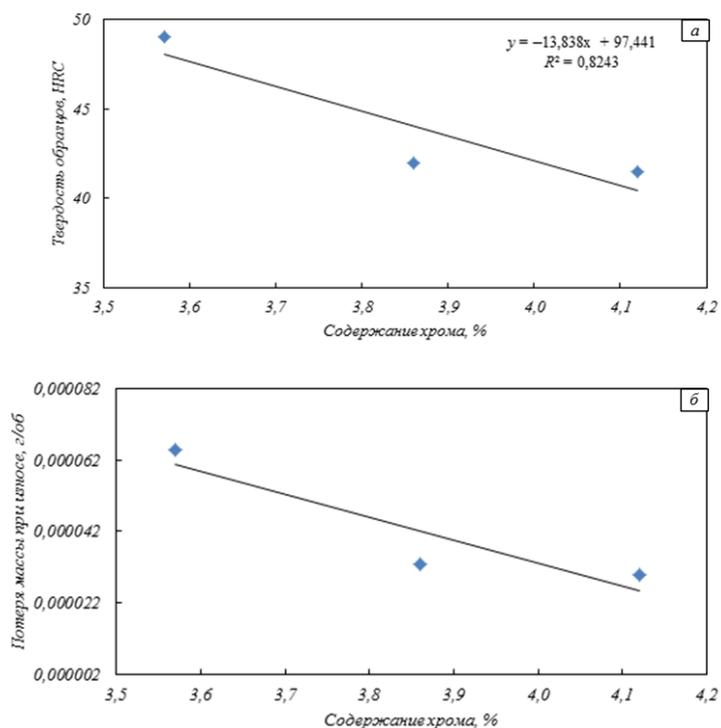


Рис. 2. Влияние содержания хрома на твердость наплавленных слоев (а) и потерю массы при износе (б)

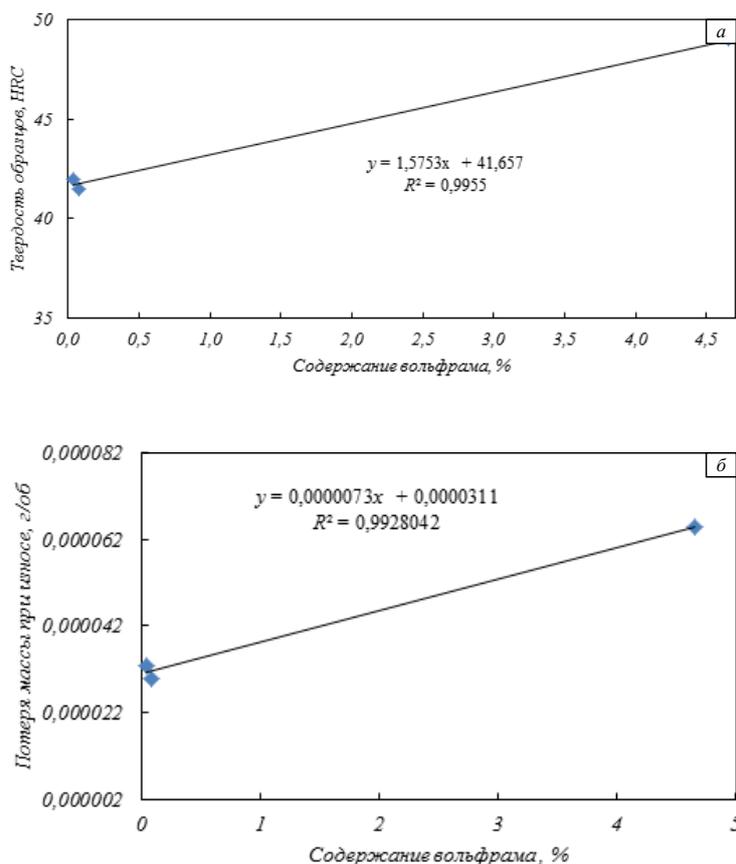


Рис. 3. Влияние содержания вольфрама на твердость наплавленных слоев (а) и потерю массы при износе (б)

ма или кобальта практически не оказывает влияния на степень загрязненности наплавленного слоя неметаллическими включениями.

Отмечена незначительная загрязненность оксидными неметаллическими включениями наплавленного металла. Предложен механизм,

описывающий износ при использовании вольфрама и кобальта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Azzoni M. Directions and developments in the types of hard phases to be applied in abrade deposits against abrasion // *WeldInternational*. 2009. Vol. 23. P. 706 – 716.
2. Klimpel A., Dobrzanski LA, Janicki D, Lisiecki A. Abrasion resistance of GMA metal cored wires surfaced deposits // *Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 164-165. P. 1056 – 1061.
3. Тепляшин М.В., Комков В.Г. Исследование влияния легирующих элементов на износостойкость в сплавах, предназначенных для электрошлаковой наплавки бил молотковых мельниц // *Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ»*. 2013. Т. 4. № 4. С. 1554 – 1561.
4. 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.
5. Чейлях Я.А., Чигарев В.В. Разработка состава экономнолегированной Fe – Cr – Mn стали с регулированием содержания и метастабильности аустенита // *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2011. № 22. С. 103 – 108.
6. Kejžar R., J. Grum. 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. 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. P. 1 – 7.
8. 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. P. 819 – 822.
9. 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*. 2013. Vol. 30. P. 316 – 322.
10. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б.Е. Патона. – М.: Металлургия, 1974. – 768 с.
11. Gusev A.I., Kibko N.V., 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 Science and Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 1 – 9.
12. Гусев А.И., Кибко Н.В., Попова М.В., Козырев Н.А., Осетковский И.В. Структура и свойства наплавленных слоев, полученных с применением порошковых проволок 40ГМФР и 40ХЗГ2МФ. – В кн.: *Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сб. научн. тр. Вып. 36.* – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2016. С. 174 – 181.
13. Гусев А.И., Козырев Н.А., Кибко Н.В., Попова М.В., Крюков Р.Е. Изучение структуры и свойств металла, наплавленного порошковой проволокой системы Fe – С – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – V – Co // *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2017. Т. 4. № 2. С. 113 – 119.
14. Гусев А.И., Кибко Н.В., Попова М.В., Козырев Н.А., Осетковский И.В. Наплавка порошковыми проволоками С – Si – Mn – Mo – V – В и С – Si – Mn – Cr – Mo – V деталей горнорудного оборудования // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 4. С. 318 – 323.

© 2018 г. А.А. Усольцев, Н.В. Кибко,
Н.А. Козырев, Л.П. Бащенко,
А.И. Гусев

Поступила 16 февраля 2018 г.