

СТРУКТУРА СВАРНОГО ШВА ИЗНОСОСТОЙКОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ СИСТЕМЫ Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo^{*}

А.И. Гусев, Д.А. Романов, Н.А. Козырев, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов

E-mail: da_rom@live.ru

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. В настоящее время наплавочные технологии активно используются в различных сферах экономики. Наплавочные технологии, оборудование и материалы являются эффективным инструментом сокращения расходов на промышленных предприятиях. Сокращение текущих расходов на предприятиях всегда актуально для решения вопроса повышения рентабельности любого производства, особенно в кризисной ситуации, когда снижение текущих затрат является одним из основных направлений для выживания как отдельных предприятий, так и целых отраслей промышленности. Одной из основных расходных статей для поддержания жизнедеятельности любого производства являются затраты, связанные с ремонтом машин и агрегатов, обеспечение их запасными деталями и узлами. Для значительного уменьшения этой статьи используют технологию восстановительной и упрочняющей наплавки. Для Кемеровской области – Кузбасса наиболее перспективным является восстановление и упрочнение поверхностей горно-шахтного оборудования. В настоящей работе продолжено исследование перспективных износостойких покрытий. На основании ранее полученных результатов по износостойкости и твердости наплавленных слоев были выбраны лучшие по свойствам покрытия для дальнейшего исследования. Методами сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа проведены исследования структуры, элементного и фазового состава образцов, наплавленных порошковой проволокой системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo. Диаметр проволоки составлял 6 мм. Наплавку проводили на образцах из стали 09Г2С при следующих условиях: сила тока 450 А, напряжение 30 В, скорость сварки 10 см/мин. Исследовали два типа наплавленных покрытий проволоками, отличающимися по химическому составу. Выявлена ликвация вольфрама и молибдена: концентрация вольфрама может изменяться более чем в три раза, а молибдена – более чем в два раза. Показано, что изломы образцов имеют подобное строение и сформированы в результате вязкого разрушения стали. На изломах исследуемых образцов выявлен поверхностный слой, который характеризуется сравнительно малым диаметром ямок излома по сравнению с объемом образцов. Выявлено, что диаметр ямок излома исследуемых образцов колеблется в пределах от десятых долей до десятков микрометров. Показано, что наиболее крупные ямки вязкого излома формируются на частицах второй фазы микронных (2 – 3 мкм) размеров. Установленные в настоящем исследовании особенности структуры и фазового состава позволяют рекомендовать к использованию такие покрытия для промышленного применения.

Ключевые слова: наплавка, покрытие, структура, фазовый состав, ликвация, излом

STRUCTURE OF THE WELD SEAM OF WEAR-RESISTANT PAD PRODUCED WITH Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo SYSTEM FLUX CORED WIRE

A.I. Gusev, D.A. Romanov, N.A. Kozыrev, V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov

E-mail: da_rom@live.ru

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

^{*}Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук МД-486.2020.8 и кандидатов наук МК-5585.2021.4, а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00044.

Abstract. At present, surfacing technologies are actively used in various spheres of the economy. Surfacing technologies, equipment and materials provide effective tool for reducing costs of industrial enterprises. The issue of reducing operating costs at enterprises is always relevant in terms of increasing profitability of any production, especially in crisis situation, when reduction of operating costs is one of the main areas for survival of both individual enterprises and entire industries. One of the main expenditure items for maintaining vital activity of any production are costs associated with maintenance and repair of machines and assemblies, providing them with spare parts and assemblies. In the matter of significant reduction in this item of expenditure, technology of restoration and surface hardening is of great help. For the Kemerovo region - Kuzbass, the most promising is mining equipment restoration and surface hardening. This article continues the study of promising wear-resistant coatings. Based on the previously obtained results on wear resistance and hardness of the deposited layers, the best coating properties were selected for further research. The structure, elemental and phase composition of the samples of the Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo system deposited with flux-cored wire were studied by methods of scanning electron microscopy and X-ray phase analysis. The wire diameter was 6 mm. Surfacing was carried out on samples made of 09G2S steel. The surfacing was carried out at a current strength of 450 A, a voltage of 30 V, and a welding speed of 10 m / min. Investigated are two types of deposited coatings with wires, differing in chemical composition. Revealed is segregation of tungsten and molybdenum; concentration of tungsten can change more than 3 times, and molybdenum - more than 2 times. It is shown that fractures of the samples have similar structure and are formed as a result of ductile fracture of steel. In fractures of samples under study, surface layer was revealed, which is characterized by a relatively small diameter of the fracture pits in comparison with volume of the samples. It was revealed that the diameter of fracture pits of the samples under study ranges from tenths to tens of micrometers. It is shown that the largest pits of a viscous fracture are formed on particles of the second phase of micron (2–3 μm) sizes. The features of the structure and phase composition established in this study make it possible to recommend the use of these coatings for industrial applications.

Keywords: surfacing, coating, structure, phase composition, liquation, fracture

Введение

В настоящее время наплавка различных износостойких покрытий активно развивается во всем мире. Например, китайские ученые исследуют коррозионное поведение износостойкого наплавленного сплава Co – Mo – Cr – Si в расплавленных фторидных солях [1 – 3]. Сравнение свойств наплавленных слоев трубчатого электрода с металлическим сердечником специального химического состава осуществляли польские ученые [4 – 6]. Оценкой стойкости к эрозии наплавленных слоев корпусов нефтегазовых долот с применением модифицированной абразивной и гидроабразивной резки занимаются ученые из США [7], Китая [8] и Хорватии [9]. Исследованием самоорганизации покрытия Fe – Mn – C – W и различных сталей при трении с поверхностно-активной смазкой занимаются польские [10, 11] и китайские ученые [12]. Наплавка используется в различных отраслях промышленности и широко распространена в мире. В зависимости от конкретных задач подбираются соответствующие составы наплавливаемых материалов.

Основными странами, производящими коксующиеся угли, являются Китай, Австралия, Россия, США, Индонезия, Канада, Индия, Германия, Польша и другие [13]. Для всех этих стран важно восстановление поверхностей горно-шахтного оборудования с целью снижения себестоимости угля и уменьшения простоя обо-

рудования [14, 15]. В России большое количество предприятий, добывающих угли различных марок, сосредоточено в Кемеровской области – Кузбассе. Для предприятий, добывающих уголь, очень важно восстановление поверхностей горно-шахтного оборудования [16].

Основными порошковыми проволоками для износостойкой наплавки горношахтного оборудования в Российской Федерации являются проволоки типа А и В по классификации Международного института сварки [17]. Оба типа проволок в своем составе содержат железо, углерод, кремний, марганец, хром, никель и молибден. В работах [18, 19], проведенных в условиях ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», определяли влияние введения различных элементов в порошковую проволоку на эксплуатационную стойкость полученного при наплавке слоя металла.

Целью настоящей работы является исследование структуры, элементного и фазового составов образцов, наплавленных порошковой проволокой системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo.

Материал и методика исследования

В качестве материала исследования были использованы образцы стали 09Г2С (0,09 % C; 2,00 % Mn; 1,00 % Si; остальное – железо (по массе)), наплавленные порошковой проволокой системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo.

Химический состав порошковых проволок

Образец	Содержание элемента, % (по массе)													
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	W	Ti	V	S	P
1	0,17	0,54	1,19	5,90	0,37	0,38	0,009	0,002	0,01	1,640	0,002	0,002	0,04	0,015
2	0,19	0,54	1,15	6,21	0,38	0,40	0,007	0,002	0,09	0,025	0,002	0,040	0,04	0,015

Наплавку осуществляли сварочным трактором ASAW-1250. Для наплавки специально изготавливали на лабораторной установке порошковую проволоку диам. 6 мм. Порошковая проволока представляла собой оболочку из стали Ст3 с сердечником. В качестве сердечника использовали порошки железа: ПЖВ1 (0,02 % C; 0,08 % Si; 0,1 % Mn; 0,015 % S; 0,015 % P; остальное – железо (по массе)); ферросилиций марки ФС 75 (0,1 % C; 0,02 % S; 0,04 % P; 3 % Al; 0,4 % Mn; 0,3 % Cr; 80 % Si; остальное – железо); высокоуглеродистый феррохром ФХ900А (65 % Cr; 8,5 % C; 2 % Si; 0,03 % P; 0,4 % S; остальное – железо); углеродистый ферромарганец ФМн 78(А) (75 % Mn; 7 % C; 6 % Si; 0,05 % P; 0,2 % S; остальное – железо); никель ПНК-1Л15 (99,7 % Ni; 0,2964 % C; 0,002 % железа; 0,001 % Si; 0,0003 % Cu; 0,0003 % Mg); ферромolibден ФМо60 [ГОСТ 4759 – 91] (60 % Mo; 0,3 % W; 0,5 % Si; 0,05 % C; 0,05 % P; 0,1 % S; 0,5 % Cu; 0,02 % As; 0,01 % Sn; 0,01 % Sb; 0,01 % Pb; 0,01 % Zn; 0,01 % Bi; остальное – железо); феррованадий ФВ50У0,6 (60 % V; 5 % Mn; 2 % Si; 0,6 % C; 0,2 % Cu; 0,02 % As; 0,3 % Al; 0,07 % P; 0,03 % S; остальное – железо); кобальта (99,32 % Co; 0,2 % Fe; 0,02 % Si; 0,4 % Ni; 0,02 % C; 0,04 % Cu) и вольфрама ПВН [ТУ 48-19-72 – 92] (0,008 % Fe; 0,001 % Al; 0,003 % Si; 0,005 % Ca; 0,005 % Ni; 0,005 % P; 0,004 % S; 0,04 % Mo; 0,003 % C; 0,005 % As; 0,02 % K; 0,015 % Na; остальное – W).

В состав образцов проволоки вместо аморфного углерода вводили пыль газоочистки производства алюминия следующего химического состава: 21,00 – 46,00 % Al_2O_3 ; 18,00 – 27,00 % F; 8,00 – 15,00 % Na_2O ; 0,40 – 6,00 % K_2O ; 0,70 – 2,30 % CaO; 0,50 – 2,50 % SiO_2 ; 2,10 – 3,30 % Fe_2O_3 ; 12,50 – 30,20 % $C_{общ}$; 0,07 – 0,90 % MnO; 0,06 – 0,90 % MgO; 0,09 – 0,19 % S; 0,10 – 0,18 % P. Исследовали образцы двух типов с разным химическим составом (табл. 1). Выбор режимов наплавки осуществляли, исходя из расчетов погонной энергии и практических результатов качества поверхности наплавляемого валика. В результате расчетов рекомендуемой погонной энергии по полученным данным были определены следующие режимы: погонная энергия $J = 30000$ Дж/см, сила тока $I = 500$ А, напряжение

$U = 30$ В, скорость сварки $V = 30$ см/мин. В результате лабораторных исследований выявлено, что для проволоки диам. 6 мм приемлемое качество наплавляемого валика получается при режиме: $I = 450$ А, $U = 30$ В, $V = 10$ см/мин. Именно эти режимы использовали в настоящей работе.

Химический состав наплавленного металла определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71. Исследования структуры, элементного и фазового составов осуществляли методами рентгенофазового анализа (дифрактометр XRD-7000, Shimadzu, Япония) и сканирующей электронной микроскопии (прибор «LEO EVO 50», Zeiss, Германия). Анализ фазового состава проводили с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4. Исследованию подвергали структуру травленной поверхности и структуру изломов. Травление поверхности образцов осуществляли в 4 %-ном растворе HNO_3 . Время травления составляло от 6 до 12 с.

Результаты и их обсуждение

Структуру травленной поверхности предварительно полированных образцов изучали методами сканирующей электронной микроскопии (рис. 1). Общим для исследуемых образцов является наличие микропор округлой формы, размеры которых, выявленные методами сканирующей электронной микроскопии, изменяются в пределах от 1,5 до 7,0 мкм. Следует отметить, что более крупные микропоры и их большее количество выявлено в образце 1 (рис. 1, а, б). Этот же образец характеризуется наличием пор диам. до 3,5 мм, выявляемых невооруженным глазом. Образец 2 имеет явно выраженную дендритную структуру (рис. 1, в, г). При травлении шлифа образца 1 дендритная структура является в менее явной форме (рис. 1, а, б).

Элементный состав исследуемых образцов изучали методами микрорентгеноспектрального анализа. На рис. 2, а и в табл. 2 приведены результаты элементного анализа образца 1. Анализируя результаты (табл. 2), можно отметить явно выраженную ликвацию вольфрама и молибдена.

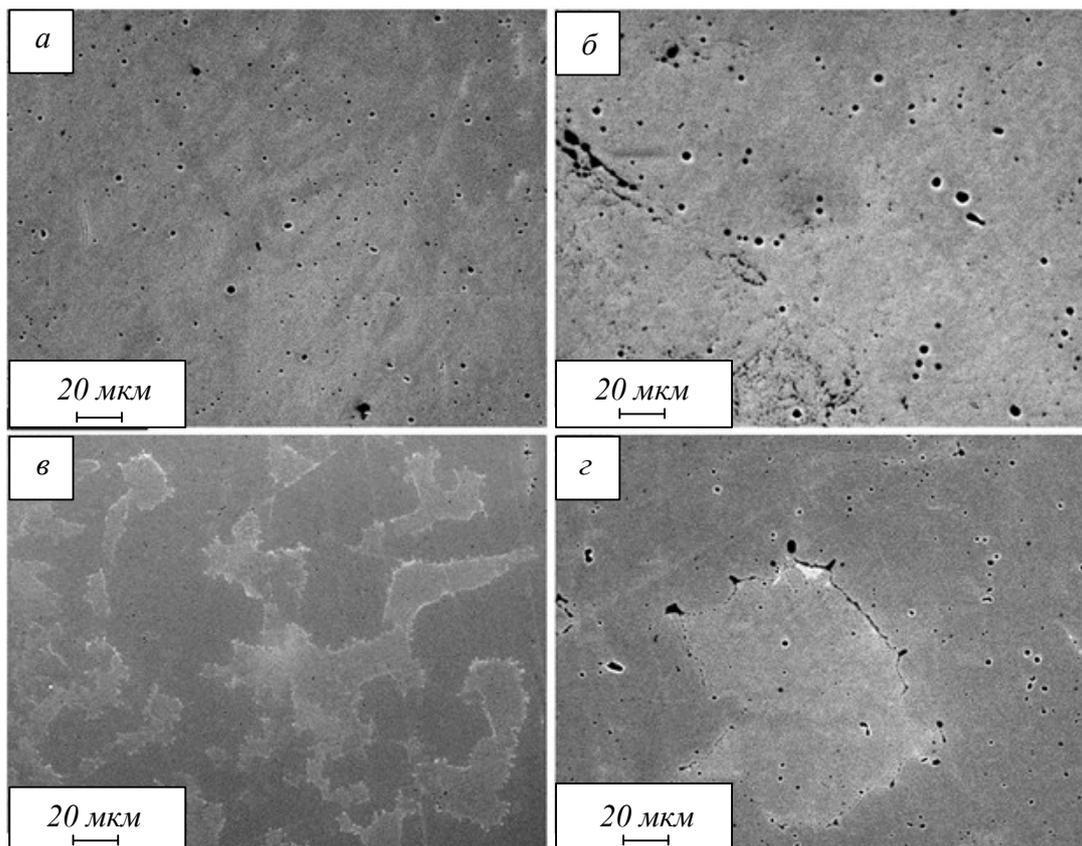


Рис. 1. Структура травленной поверхности образцов 1 (а, б) и 2 (в, з)

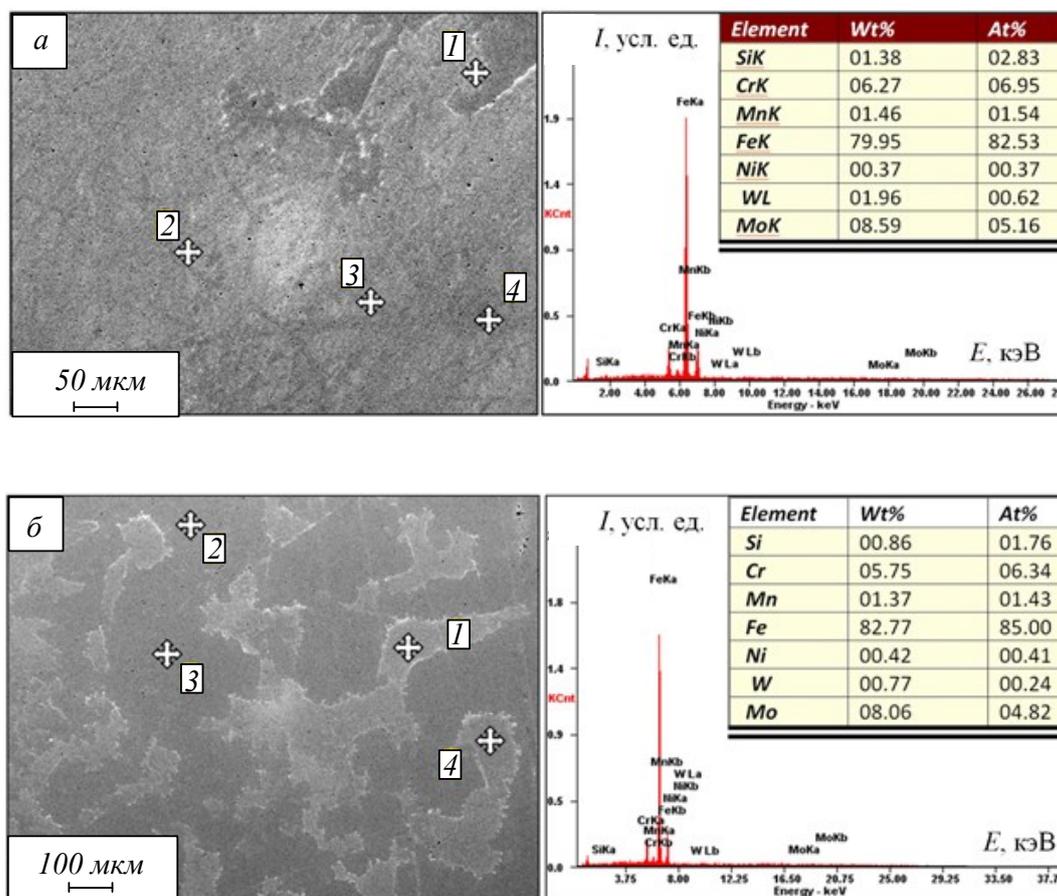


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры травленной поверхности и энергетический спектр образцов, полученные методом «по площадям» с участка образцов 1 (а) и 2 (б)

Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности образца 1

Элемент	Содержание элемента, % (по массе), в области анализа				
	вся площадь	область 1	область 2	область 3	область 4
Si	1,26	1,32	1,12	1,49	1,60
Cr	6,23	6,07	5,82	6,15	6,15
Mn	1,48	1,45	1,32	1,28	1,19
Fe	80,10	83,39	81,36	85,45	80,90
Ni	0,30	0,18	–	0,16	0,18
W	2,18	1,54	0,34	0,59	1,88
Mo	8,45	6,05	10,04	4,88	8,10

При этом концентрация вольфрама может изменяться более чем в три раза, а молибдена более чем в два раза при переходе от точки к точке на поверхности образца. Подобным образом происходит и при исследовании элементного состава поверхности образца 2 (рис. 2, б; табл. 3).

Анализ результатов, представленных в табл. 3 и на рис. 2, б показывает, что области дендритной кристаллизации (светлые области обозначены 1 и 4) обеднены, а междендритные пространства (темные области обозначены 2 и 3) обогащены легирующими элементами. В основном образцы 1 и 2 легированы молибденом и вольфрамом.

Фазовый состав наплавленных образцов изучали методами рентгенофазового анализа. На рис. 3 приведены характерные рентгенограммы, полученные с этих образцов. Анализ рентгенограмм показывает, что основной фазой образцов является твердый раствор на основе α -Fe (твердый раствор на основе объемно-центрированной кристаллической решетки железа). Параметр кристаллической решетки (a) стали образцов 1 и 2 составляет 0,28766 и 0,28740 нм, что существенно больше параметра кристаллической решетки α -железа ($a = 0,2866$ нм). Дифракционная линия [110] α -Fe искажена (рис. 3, участок указан стрелкой). Это очевидно свидетельствует о наличии в стали включений второй фазы. Фазовый анализ при наличии на рентгенограмме единственного рефлекса влечет за собой воз-

можную ошибку. Можно предположить, что данный дифракционный максимум может принадлежать кристаллической решетке γ -Fe, или кристаллической решетке карбида хрома состава CrC (расчет произведен по карточке 04-016-7242 международной базы данных).

Характерная структура излома образца 1 приведена на рис. 4, а – з, образца 2 – на рис. 4, д – з. Отчетливо видно, что изломы обоих материалов сформированы в результате вязкого разрушения сплава.

Характерными элементами вязкого разрушения являются ямки вязкого излома. Размеры ямок вязкого излома в промышленных сплавах практически всегда варьируются в широких пределах. Одновременно наблюдаются сетки ямок малых размеров, зарождающихся вокруг дисперсных частиц второй фазы, и ямки среднего размера (рис. 4, з, з). Разнообразие размеров ямок вязкого излома можно объяснить следующим образом. Ямки на поверхности вязкого излома являются результатом образования, роста и слияния множества микропор в процессе разрушения материала. Микропоры зарождаются на поверхностях раздела между матрицей и частицами второй фазы, размеры и распределение которых могут варьироваться в весьма широких пределах.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности образца 2

Элемент	Содержание элемента, % (по массе), в области анализа				
	вся площадь	область 1	область 2	область 3	область 4
Si (K)	0,86	0,69	0,84	0,50	0,43
Cr (K)	5,75	5,46	6,35	5,60	5,61
Mn (K)	1,37	1,26	1,44	1,58	1,48
Fe (K)	82,77	88,75	79,43	81,93	87,62
Ni (K)	0,42	–	0,27	0,52	0,14
W (L)	0,77	–	1,53	0,86	–
Mo (K)	8,06	3,84	10,14	9,01	4,72

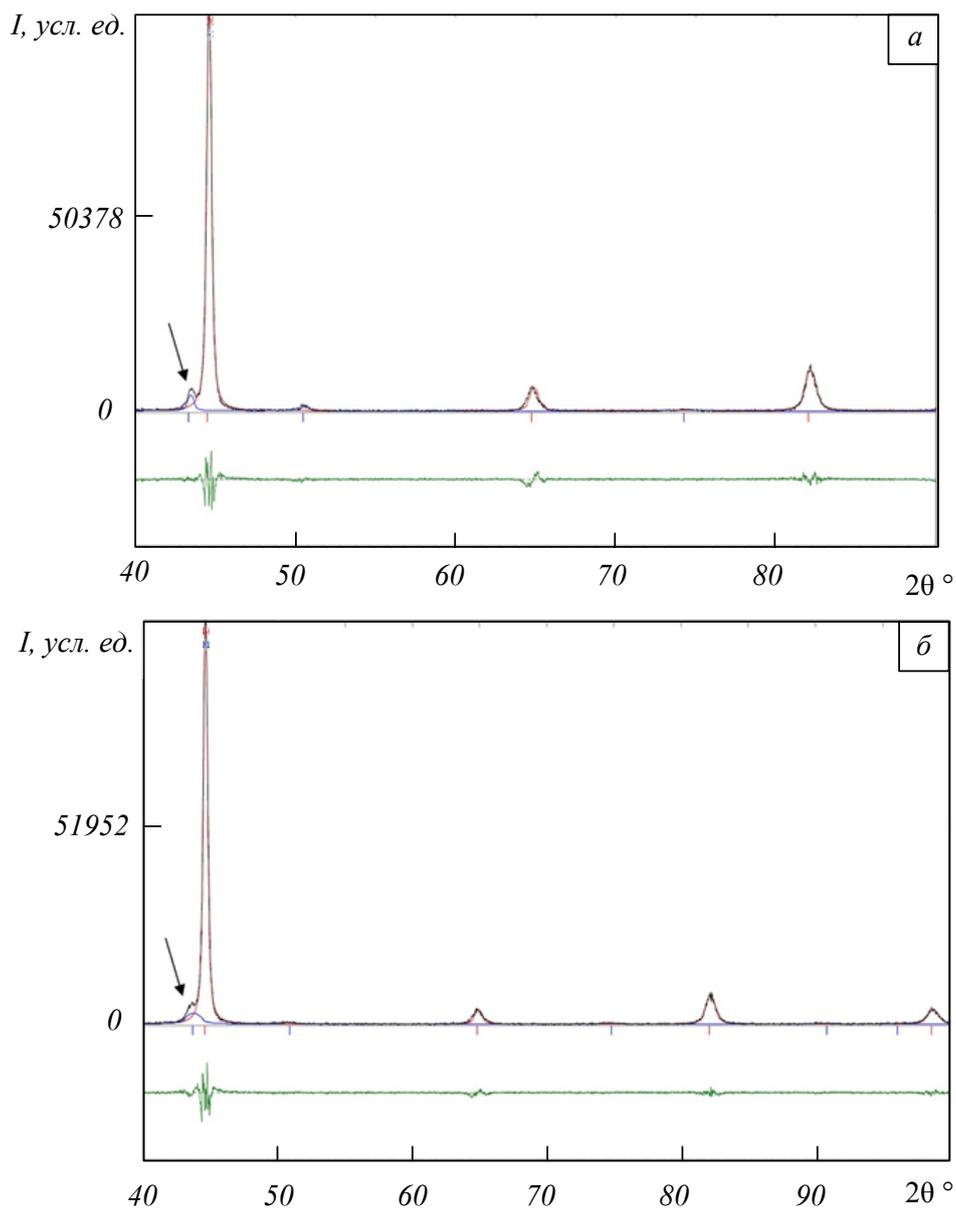


Рис. 3. Рентгенограммы, полученные с образцов 1 (а), 2 (б)

Размеры и глубину ямок можно связать с размером частиц и расстоянием между ними, схемой напряженного состояния, а также с вязкостью разрушения материала. Анализ результатов (рис. 4) показывает, что в образце 1 диаметр ямок излома колеблется в пределах от 0,50 до 75,00 мкм (рис. 4, з). В образце 2 диаметр ямок излома колеблется в пределах от 0,25 мкм (рис. 4, е) до 70,00 мкм (рис. 4, з). Следует отметить, что на изломах обоих образцов явно выявлен поверхностный слой, толщина которого в образце 2 (рис. 4, д) более чем в пять раз больше, чем в образце 1 (рис. 4, а). Эти слои характеризуются сравнительно малым диаметром ямок излома (рис. 4, д, з).

Выводы

Исследовали перспективные износостойкие покрытия. Методами сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа проведены исследования структуры, элементного и фазового состава образцов, наплавленных порошковой проволокой системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo. Наплавку проводили на образцах из стали 09Г2С. Выявлена ликвация вольфрама и молибдена: концентрация вольфрама может изменяться более чем в три раза, а молибдена – более чем в два раза. Изломы образцов имеют подобное строение и сформированы в результате вязкого разрушения стали. На изломах исследуемых образцов выявлен поверхностный слой,

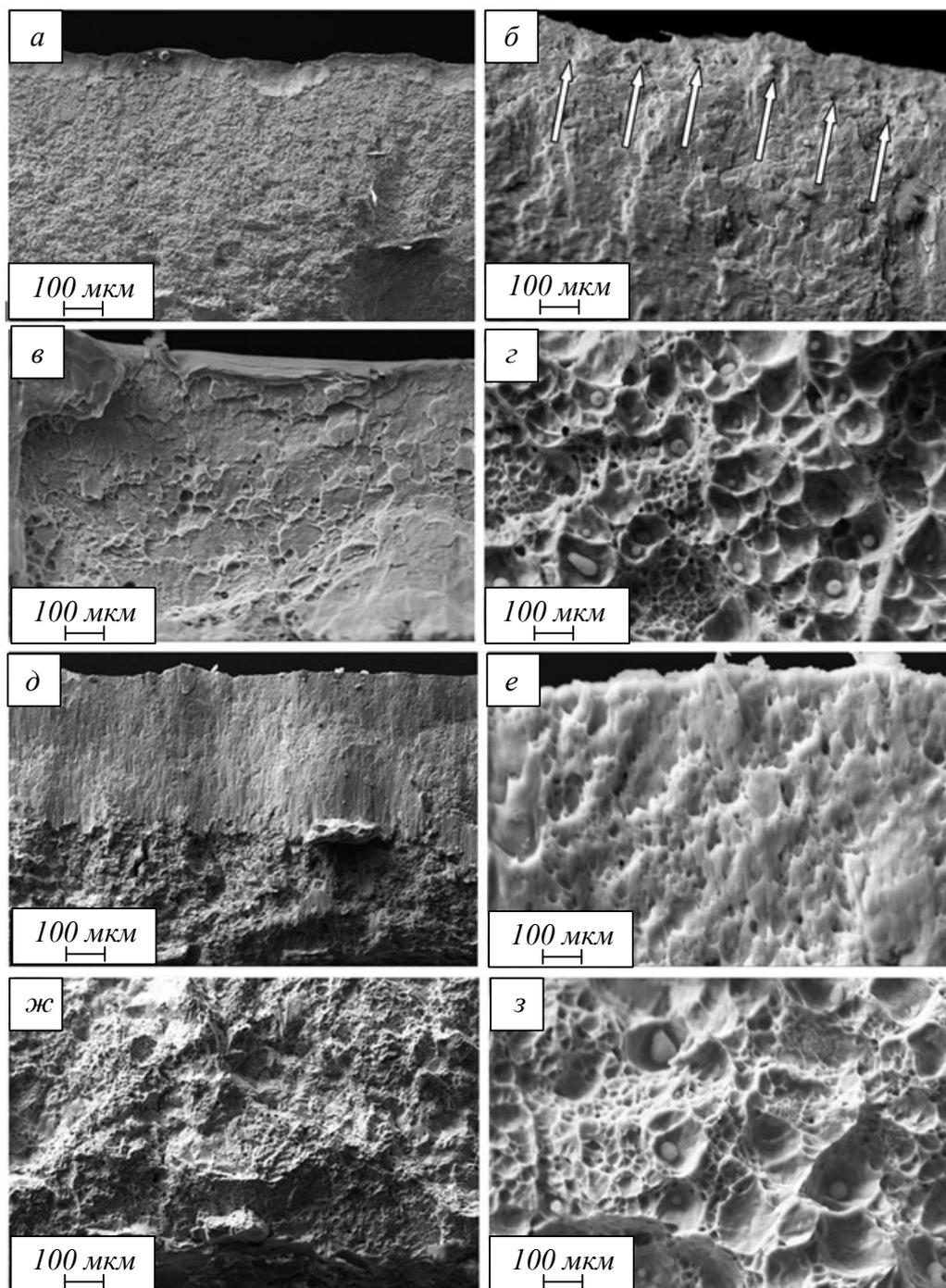


Рис. 4. Структура поверхности излома образцов 1 (а – з) и 2 (д – з). Сканирующая электронная микроскопия

который характеризуется сравнительно малым диаметром ямок излома по сравнению с объемом образцов. Выявлено, что диаметр ямок излома исследуемых образцов колеблется в пределах от десятых долей до десятков микрометров. Наиболее крупные ямки вязкого излома формируются на частицах второй фазы микронных. Особенности структуры и фазового состава позволяют рекомендовать к использованию такие покрытия для промышленного применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wu Y., Leng B., Li X., Jiang L., Ye X., Chen Y., Yang X., Li Z., Zhou X. Corrosion behavior of a wear resistant Co-Mo-Cr-Si alloy in molten fluoride salts // Journal of Nuclear Materials. 2020. Vol. 542. Article 152529.
2. Chan K.J., Singh P.M. Corrosion Behavior of Pre-Carburized Hastelloy N, Haynes 244, Haynes 230, and Incoloy 800H in Molten FLiNaK // Nucl. Technol. 2020. Vol. 206. P. 1751 – 1768.

3. Falconer C., Doniger W.H., Bailly-Salins L., Buxton E., Elbakhshwan M., Sridharan K., Couet A. Non-galvanic mass transport in molten fluoride salt isothermal corrosion cells // *Corrosion Science*. 2020. Vol. 177. No. 12. Article 108955.
4. Czupryński A. Comparison of properties of hardfaced layers made by a metal-core-covered tubular electrode with a special chemical composition // *Materials (Basel)*. 2020. Vol. 13. No. 23. Article 5445.
5. Czupryński A., Wyględacz B. Comparative analysis of laser and plasma surfacing by nickel-based superalloy of heat resistant steel // *Materials (Basel)*. 2020. Vol. 13. No. 10. Article 2367.
6. Lisiecki A., Ślizak D. Hybrid laser deposition of Fe-based metallic powder under cryogenic conditions // *Met*. 2020. Vol. 10. P. 190.
7. Liu W., Bell A., Wang Z., Zhang Z., Kovacevic R. Evaluation of the slurry erosion resistance of the body materials of oil & gas drill bits with a modified abrasive waterjet // *Wear*. 2020. Vol. 456-457. Article 203364.
8. Fu Y., Zhou F., Gao Y., Zhang L. Microstructure and hardness properties of low power plasma sprayed WC-Co cermet coatings // *Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng/Rare Met. Mater. Eng.* 2007. Vol. 36. P. 731 – 734.
9. Ćurković L., Kumić I., Grilec K. Solid particle erosion behaviour of high purity alumina ceramics // *Ceram. Int*. 2011. Vol. 37. P. 29 – 35.
10. Barszcz M., Pashechko M., Dziedzic K., Jozwik J. Study on the self-organization of an Fe-Mn-C-B coating during friction with surface-active lubricant // *Materials (Basel)*. 2020. Vol. 13. No. 13. Article 3025.
11. Pashechko M., Dziedzic K., Jozwik J. Analysis of wear resistance of borided steel C45 // *Materials (Basel)*. 2020. Vol. 13. No. 23. Article 5529.
12. Zhang E., Gao F., Fu R., Lu Y., Han X., Su L. Tribological behavior of phenolic resin-based friction composites filled with graphite // *Materials (Basel)*. 2021. Vol. 14. No. 4. Article 742.
13. Плакиткина Л.С. Анализ развития угольной промышленности в основных странах мира // *Горная Промышленность*. 2011. Т. 96. №. 2. С. 18.
14. Fan H., Zhang X., Cao X., Wan X., Yang Y. Research status and prospect of fault diagnosis of China's coal mine machines under background of intelligent mine // *Zhendong yu Chongji/Journal of Vibration and Shock*. 2020. Vol. 39. P. 194 – 204.
15. Miller J. Australia counts on mining's quest for value, innovation to sell its technology // *Eng. Min. J*. 2010. Vol. 211. P. 74 – 79.
16. Grebennikov A.V., Starikova L.N. Innovative development as a basis of increase of competitiveness of heavy mechanical engineering in the kemerovo region // *Gornyi Zhurnal*. 2013. Vol. 5. P. 69 – 72.
17. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под. ред. Б.Е. Патона. – М.: Металлургия, 1974. – 768 с.
18. Gusev A.I., Kozyrev N.A., Osetkovskiy I.V., Usoltsev A.A. Developing New Powder Wire for Surfacing Details Which Works in the Wear Resistace Conditions // *Mater. Process. Technol. Mater. Sci. Forum*. 2018. Vol. 927. P. 126 – 133.
19. Gusev A.I., Kozyrev N.A., Usoltsev A.A., Kryukov R.E., Mikhno A.R. Development of a flux-cored wire for surfacing mining equipment operating in the conditions of shock-abrasive wear // *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.* 2018. Vol. 206. Article 012034.

© 2021 г. А.И. Гусев, Д.А. Романов,
Н.А. Козырев, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов
Поступила 4 марта 2021 г.