

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СТАЛИ ПОСЛЕ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВ ТИТАНА, ТАНТАЛА, МОЛИБДЕНА И ГРАФИТА*

Д.О. МУЛЬ¹, аспирант
Е.А. ДРОБЯЗ¹, канд. техн. наук, доцент
И.К. ЧАКИН², инженер
В.В. САМОЙЛЕНКО¹, аспирант
В.С. ЛОЖКИН¹, аспирант
Р.А. ДОСТАВАЛОВ¹, студент
¹(НГТУ, г. Новосибирск)
²(ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск)

Поступила 26 июля 2013 года

Рецензирование 26 августа 2013 года

Принята к печати 5 сентября 2013 года

Муль Д.О. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: ddariol@yandex.ru

Рассмотрены особенности формирования структуры в поверхностных слоях конструкционной стали 40Х, подвергнутой вневакуумной электронно-лучевой наплавке порошковых смесей. Для получения покрытий использовали три вида наплавочных порошковых смесей: титан и графит; титан, молибден и графит; титан, тантал и графит. В наплавочных покрытиях в процессе ускоренного нагрева и последующего охлаждения формируется сложная высокодисперсная кристаллическая структура. В слоях наплавленного металла, содержащих титан с графитом, титан, молибден с графитом, зафиксировано присутствие карбида титана (TiC). Увеличение его объемной доли приводит к повышению твердости покрытий. Введение молибдена способствует формированию однородной структуры мартенсита. Износостойкость наплавленных покрытий коррелирует с уровнем их твердости.

Ключевые слова: вневакуумная электронно-лучевая наплавка, износостойкость, карбиды.

Введение

Одним из эффективных вариантов повышения долговечности деталей машин и механизмов является их поверхностное упрочнение карбидами тугоплавких металлов. Введение высокопрочных включений в материалы, предназначенные для изготовления изделий, эксплуатирующихся в условиях повышенных нагрузок, позволяет в значительной мере повысить их износостойкость. Эффективным способом повышения триботехнических свойств металлических материалов является поверхностное легирование карбидом титана, обладающего высокой твердостью (28 ГПа), износостойкостью и температурой плавления (3067 °С) [1, 2].

В настоящее время распространенными способами поверхностного легирования металлических материалов являются спекание, электродуговая и индукционная наплавка [3]. Однако указанные технологии не обеспечивают возможность контролируемого местного нагрева материала, приводящего к расплавлению только поверхностных слоев основного металла и порошковой смеси. Такой нагрев эффективно реализуется при воздействии на поверхностные слои высокоэнергетических источников нагрева, среди которых следует особо выделить электронный пучок, выведенный в воздушную атмосферу [4–6]. Вневакуумная электронно-лучевая обработка позволяет формировать покрытия различного химического

* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, соглашение № 14.В37.21.0447 от 06 августа 2012 года.

состава, в том числе и на крупногабаритных изделиях [7]. Анализ литературных данных свидетельствует о возможности формирования покрытий на основе тугоплавких элементов, обладающих высокими показателями твердости и износостойкости, с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки [8–11].

Цель данной работы заключается в изучении структурных и фазовых превращений в поверхностных слоях конструкционной стали при электронно-лучевой наплавке титансодержащих порошковых смесей и оценке их влияния на твердость и износостойкость покрытий.

Материалы и методы исследования

Наплавку порошковых смесей проводили на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-6 производства Института ядерной физики СО РАН электронным пучком, выведенным в воздушную атмосферу. Обработка осуществлялась по следующим режимам: энергия электронов пучка – 1,4 МэВ; расстояние от выпускного отверстия до образца – 90 см; ток пучка – 27...28 мА. Заготовка перемещалась со скоростью 10 мм/с в направлении, перпендикулярном направлению действия электронного пучка. Наплавка производилась при сканировании образца электронным пучком с частотой 26 Гц, что позволило обработать всю поверхность.

Наплавке подвергались пластины из отожженной конструкционной стали 40Х размером 100×50×16 мм. На предварительно подготовленную поверхность материала наносилась наплавочная смесь с насыпной плотностью 0,33 г/см². Для получения покрытий применяли три вида порошковых смесей, которые содержали 60 масс. % легирующих компонентов и 40 масс. % флюса (CaF₂). Наплавочная смесь типа «А» состояла из порошка титана (71,4 масс. %) и графита (28,6 масс. %). Смесь типа «Б» содержала 63,4 масс. % титана, 21,8 масс. % графита и 14,8 масс. % молибдена. В смеси типа «В» находилось 30 масс. % титана, 3,3 масс. % графита и 26,7 масс. % тантала.

Формирование покрытий происходило в условиях высокоскоростного нагрева поверхностного слоя за счет большого количества энергии, выделяющейся при торможении электронов. При этом нагрев осуществлялся до значений выше температуры плавления материала. Ускоренное охлаждение расплава за счет интенсивного теплоотвода приводило к формированию на стальной заготовке покрытия. Полученные образцы подвергались структурным и триботехническим исследованиям.

Для проведения структурных исследований и определения показателей микротвердости из по-

лученных образцов с использованием стандартной технологии были изготовлены поперечные шлифы. Структуру материалов выявляли методом химического травления с применением 5 %-го раствора азотной кислоты в этиловом спирте [12]. Структурные исследования осуществляли с применением оптического микроскопа типа *Carl Zeiss Axio Observer Z1m* и растрового электронного микроскопа типа *Carl Zeiss EVO 50 XVP*. Объемную долю карбидной фазы определяли методом анализа изображений на оптическом микроскопе с применением модуля *Multiphase*.

Рентгенофазовый анализ покрытий был проведен с использованием дифрактометра *ARL X'TRA*. Источником излучения являлась медная трубка. Рентгенограммы регистрировали с шагом 0,05 град. и временем накопления 3 с. Химический состав покрытий определяли на оптико-эмиссионном спектрометре *ARL 3460*.

Микротвердость покрытий устанавливали на микротвердомере *Wolpert Group 402MVD*. Измерения проводили с нагрузкой 10 г. Дорожки уколов были ориентированы в направлении от поверхности покрытия образца к основному материалу.

Оценить эффективность высокопрочных покрытий при эксплуатации в реальных условиях позволили триботехнические испытания. Износостойкость определяли в условиях трения о закрепленные абразивные частицы. Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 17367-71 в течение 35 с при скорости вращения круга 100 об/мин и нагрузке на образец 3Н.

Результаты исследований и их обсуждение

Структурные исследования покрытий, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки, показали, что в процессе обработки формируются слои, толщина которых составляет 2,07, 2,39 и 2,12 мм для смесей типа «А», «Б» и «В» соответственно. Дефектов в виде трещин и расслоений ни на поверхности образцов, ни в объеме покрытий обнаружено не было. Объемная доля легирующих элементов в поверхностном слое уменьшается с увеличением толщины получаемого покрытия. Химический состав материалов, представленный в табл. 1, свидетельствует о снижении концентрации легирующих элементов в поверхностных слоях наплавленных покрытий.

Металлографические исследования показали, что в покрытии «А» наблюдается наибольшее количество карбида титана. Частицы в виде дендритных построений равномерно распределены по всему объему покрытия (рис. 1, а). Размер частиц карбида титана изменяется от 1 до 5 мкм. Кроме того, в покрытии присутствуют колонии ледебурита-

Таблица 1

Химический состав наплавленных покрытий

| Покрытие | Массовая доля элемента, % | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | C | Mn | Si | P | S | Ni | Cr | Mo | Ti | Ta | Fe |
| «А» | 2,67 | 0,68 | 0,27 | 0,02 | 0,02 | 0,14 | 0,94 | 0,02 | 7,23 | - | 88,01 |
| «Б» | 1,27 | 0,78 | 0,31 | 0,02 | 0,01 | 0,16 | 1,03 | 0,73 | 2,67 | - | 93,02 |
| «В» | 0,85 | 0,71 | 0,33 | 0,02 | 0,02 | 0,18 | 0,94 | 0,03 | 5,15 | 5,63 | 86,14 |

та, микрообъемы феррита, мартенсита и остаточного аустенита.

В покрытиях, содержащих молибден и тантал, объемная доля карбида титана меньше. Упрочнению поверхностных слоев способствуют также сложные карбиды на основе молибдена и тантала. Добавки молибдена приводят к формированию в покрытиях высокопрочной мартенситной структуры, что отражается на повышении твердости и износостойкости материалов.

Введение тантала в наплавочную смесь, содержащую титан и графит, приводит к образованию сложного карбида $TiTaC_2$, частицы которого сформировали крупные дендритные построения с осями первого и второго порядка (рис. 1, в, 2, в). Размер таких частиц достигает 70 мкм. Карбид $TiTaC_2$ также входит в состав тонкой игольчатой структуры эвтектики.

Рентгенофазовый анализ покрытий позволил оценить фазовый состав сформированных покрытий (рис. 2). В образцах типа «А» и «Б» наблюдаются пики, соответствующие фазам α -Fe, γ -Fe, TiC (рис. 2, а, б). Высокий пик γ -Fe в покрытии «А» свидетельствует о наличии большого количества остаточного аустенита в матрице.

Результаты дюрOMETРИЧЕСКИХ исследований представлены в табл. 2. Установлено, что введение в смесь молибдена приводит к увеличению твердости

Таблица 2

Основные параметры наплавленных покрытий

| Покрытие | Средняя твердость покрытий, МПа | Микротвердость матрицы, МПа | Микротвердость дендритных образований, МПа | Объемная доля дендритных карбидов, % |
|----------|---------------------------------|-----------------------------|--|--------------------------------------|
| «А» | 7460±5 | 5470±1233 | 13250±3255 | 30,92 |
| «Б» | 7720±6 | 6542±777 | 20394±7339 | 27,93 |
| «В» | 2280±3 | 2807±441 | 5462±753 | 17,33 |

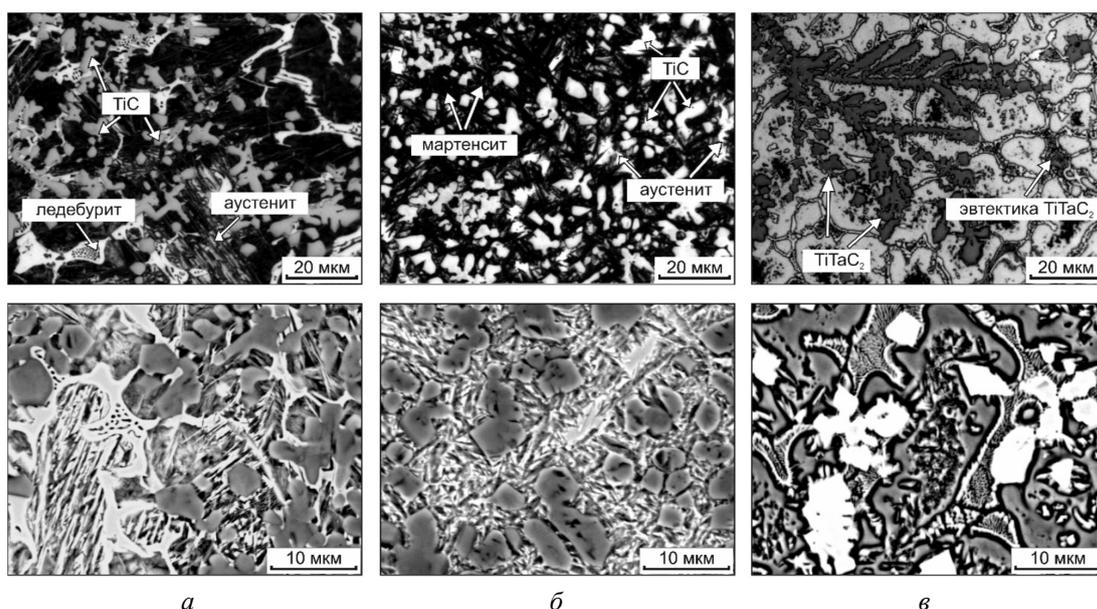


Рис. 1. Строение покрытий, сформированных наплавкой титана и графита (а), титана, молибдена и графита (б), титана, тантала и графита (в)

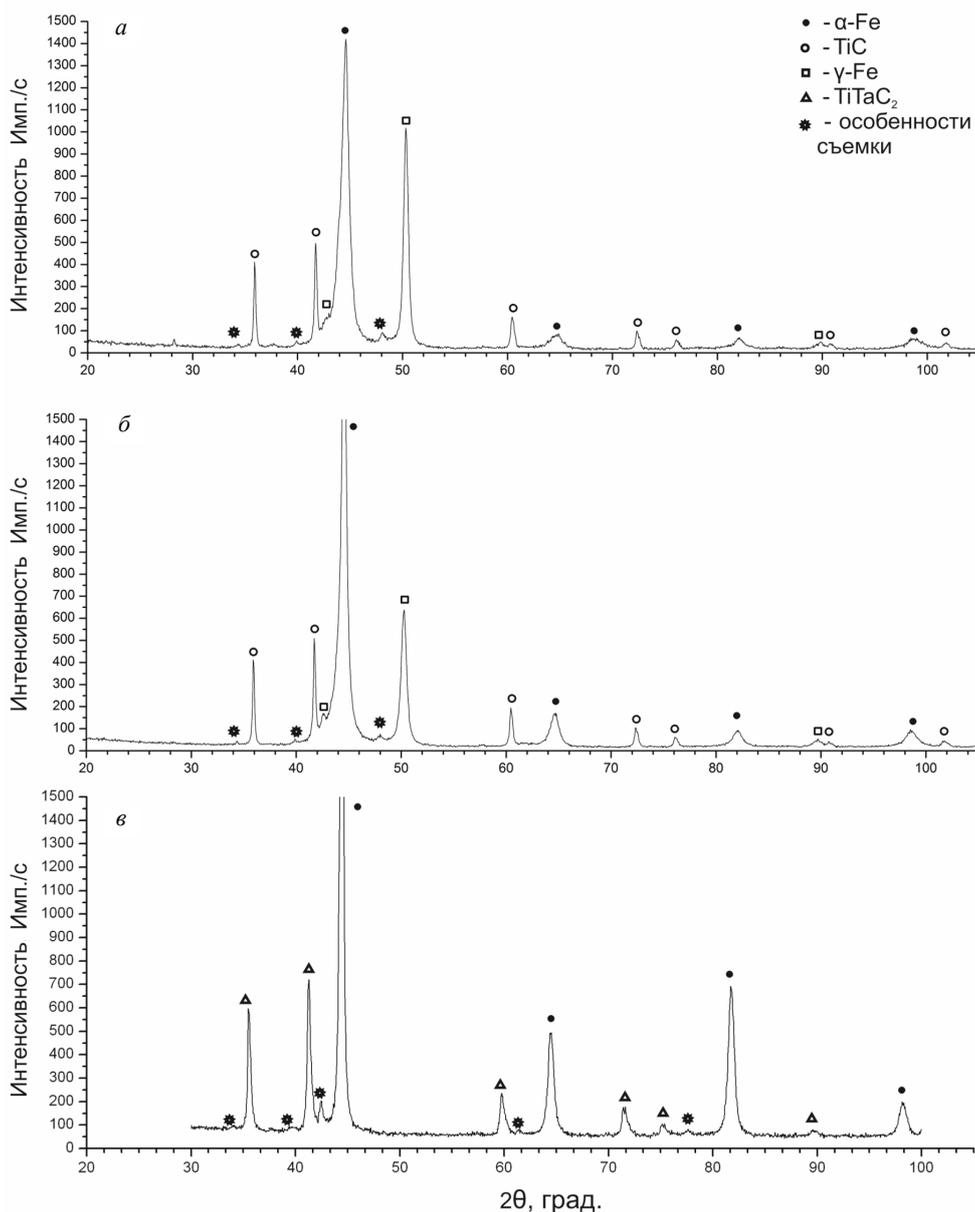


Рис. 2. Рентгенограммы образцов, полученных наплавкой порошков титана и графита (а), титана, молибдена и графита (б), титана, графита и тантала (в)

покрытия на основе титана и углерода на 300 МПа. Объясняется это повышением твердости карбида титана за счет его легирования (20 ГПа). Добавка тантала снижает микротвердость покрытия до 2280 МПа, что обусловлено низкой твердостью карбида TiTaC_2 (5,5 ГПа) и легированного феррита (2,8 ГПа).

В зоне термического воздействия, находящейся непосредственно под покрытием, микротвердость материала составляет ~ 5000 МПа. На графике, представленном на рис. 3, наблюдаются скачки микротвердости, свидетельствующие о неоднородности структуры покрытия.

На показатели твердости оказывает влияние и объемная доля тугоплавких включений в структуре покрытия. Объемная доля карбидов в форме дендритов представлена в табл. 2. Наибольшая концентра-



Рис. 3. Распределение микротвердости наплавленных образцов в поперечном сечении:

1 – покрытие из смеси порошков титана, молибдена и графита; 2 – покрытие из смеси порошков титана и графита; 3 – покрытие из смеси порошков титана, тантала и графита

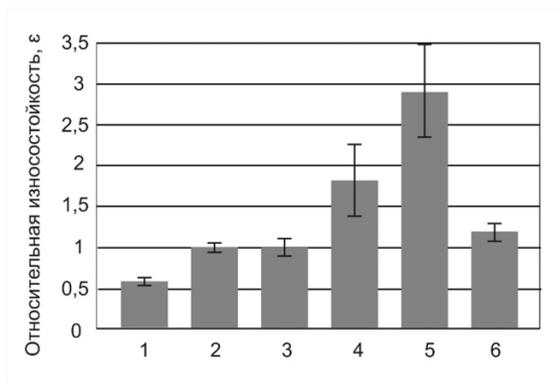


Рис. 4. Износостойкость образцов при трении о закрепленные абразивные частицы:

1 – сталь 40X после отжига; 2 – сталь 40X после закалки и низкого отпуска; 3 – сталь 20 после цементации; 4 – покрытие из смеси титана с графитом; 5 – покрытие из смеси титана, графита и молибдена; 6 – покрытие из смеси титана, графита и тантала

ция частиц этого типа наблюдается в покрытии «А» и составляет 30,92 %. В покрытии «Б» доля карбидов снижается до 27,93 %, а в покрытии «В» она составляет 17,33 %.

Результаты триботехнических испытаний в условиях трения о закрепленные абразивные частицы представлены на рис. 4. В качестве эталонного материала была выбрана сталь 20 после закалки и цементации. Легирование поверхности стали 40X титаном и графитом способствовало повышению износостойкости в 3 раза, а добавление в порошковую смесь молибдена повысило износостойкость материала в 4,8 раза. Наплавка порошковой смеси титана, тантала и графита обеспечила повышение износостойкости в 2 раза по сравнению с материалом основы. Такое поведение объясняется высокой твердостью карбидов титана и их повышенной концентрацией в структуре покрытий типа «А» и «Б». В танталсодержащем покрытии объемная доля сложных карбидов мала. Следует отметить также, что карбиды $TiTaC_2$ располагаются в ферритной матрице, обладающей пониженной твердостью.

Выводы

Вневакуумная электронно-лучевая наплавка в воздушной среде позволяет формировать высоколегированные покрытия с мелкодисперсной структурой на низколегированной конструкционной стали 40X. В наплавленных покрытиях высокой толщины отсутствуют дефекты в виде трещин и расслоений.

Введение в порошковую титан-графитовую смесь молибдена приводит к формированию ультрадисперсной структуры, обеспечивающей повышенный

уровень твердости и износостойкости. Механизмы упрочнения изученных материалов основаны на образовании в наплавленных слоях карбидов титана и микрообъемов мартенсита.

Список литературы

1. Лившиц Л.С. Гринберг Э.Г., Куркумели Н.А. Основы легирования наплавленного металла. – М.: Машиностроение. – 1969. – 188 с.
2. Купарисов С.С., Левинский Ю.В., Петров А.П. Карбид титана: получение, свойства, применение. – М.: Металлургия. – 1987. – 216 с.
3. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление / пер. с яп. В.Н. Попова; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение. – 1985. – 240 с.
4. Полетика И.М., Голковский М.Г., Борисов М.Д., Салимов Р.А., Перовская М.В. Формирование упрочняющих покрытий методом наплавки в пучке релятивистских электронов // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 5. – С. 29–41.
5. Голковский М.Г. Закалка и наплавка релятивистским электронным пучком вне вакуума. Технологические возможности метода. Saarbrücken: LAPLAMBERT Academic Publishing. – 2013. – 317 с.
6. Создание нового класса покрытий методом двойной электронно-лучевой обработки / Полетика И.М. [и др.] // Перспективные материалы. – 2011. – № 1. – С. 71–81.
7. Technological applications of BINP industrial electron accelerators with focused beam extracted into atmosphere / S.N. Fadeev, M.G. Golkovski, A.I. Korzhagin, N.K. Kuksanov, A.V. Lavruhin, S.E. Petrov, R.A. Salimov, A.F. Vaisman // Radiation Physics and Chemistry. 2000. № 57, pp. 653-655.
8. Eunsub Yun, Yong Chan Kim, Sunghak Lee, Nack J. Kim. Correlation of microstructure with hardness and wear resistance in (TiC,SiC)/stainless steel surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation // Metallurgical and materials transactions A. 2004. Vol. 35A, pp. 1029-1038.
9. Nam D., Lee K., Lee S. Correlation of microstructure with hardness and wear resistance of carbide-reinforced ferrous surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation // Metallurgical and materials transactions A. 2008. Vol. 39A, pp. 2626-2634.
10. Seong-Hun Choo, Sunghak Lee, Soon-Ju Kwon. Effect of flux addition on the microstructure and hardness of TiC-reinforced ferrous surface composite layers fabricated by high-energy electron beam irradiation // Metallurgical and materials transactions A. 1999. Volume 30, Issue 12, pp. 3131-3141.
11. Jongmin Lee, Kwangjun Euh, Jun Cheol Oh, Sunghak Lee. Microstructure and hardness improvement of TiC/stainless steel surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation // Materials Science and Engineering: A. 2002. № 323, Issue 1 – 2, pp. 251-259.
12. Коваленко В.С. Металлографические реактивы: справочник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1981. – 120 с.

Obrabotka metallov

N 3 (60), July–September 2013, Pages 115-120

Structure and properties of steel under non-vacuum electron-beam welding deposition of titanium, tantalum, molybdenum and graphite powders

¹D.O. Mul, ¹E.A. Drobyaz, ²I.K. Chakin, ¹V.V. Samoilenko, ¹V.S. Lozhkin, ¹R.A. Dostovalov

¹Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,
Novosibirsk, 630073, Russia

²Institute of Nuclear Physics, Prospect akademika Lavrentieva, 11,
Novosibirsk, 630090, Russia

E-mail: ddariol@yandex.ru

Abstract

Features of the structure formation in surface layers of structural steel 40X subjected to the electron beam welding of titanium-containing powder mixtures were studied. The formation of coating is carried out with the usage of three types of powders mixtures: titanium and carbon (graphite); titanium, molybdenum and carbon (graphite); titanium, tantalum and carbon (graphite). The presence of complicated ultra-dispersive crystalline structure in the coating is detected. It is formed during high-speed cooling. Availability of titanium carbide (TiC) presence in the surface layer is detected by X-ray diffraction analysis. Growth of the titanium carbide volume fraction in the surface layer leads to increase in hardness. The molybdenum injection allows forming the uniform martensite matrix structure which promotes significantly improved hardness of coatings. It is found that the wear resistance of coatings directly depends on its hardness.

Keywords: non-vacuum electron-beam welding deposition, wear resistance, carbides

References

1. Livshic L.C. Grinberg Je.G., Kurkumeli H.A. *Osnovy legirovaniya naplavlennogo metalla* (Basics of added metal alloying). Moscow, Mashinostroenie, 1969. 188 p.
2. Kiparisov S.S., Levinskij Yu.V., Petrov A.P. *Karbid titana: poluchenie, svoystva, primeneniye* (Titanium carbide: production, properties and application). Moscow, Metallurgija, 1987. 216 p.
3. Hasui A., Morigaki O. *Naplavka i napylenie* [Surfacing and spraying]. *Per. s jap. V.N. Popova; pod red. V.S. Stepina, N.G. Shesterkina* [Translated from Japanese V.N. Popova, editors V.S. Stepina, N.G. Shesterkina]. Moscow, Mashinostroenie, 1985. 240 p.
4. Poletika I.M., Golkovski M.G., Borisov M.D., Salimov R.A., Perovskaja M.V. *Fizika i himiya obrabotki materialov*, 2005, no.5, pp. 29-41.
5. Golkovskii M.G. *Zakalka i naplavka relativistskim jelektronnym puchkom vne vakuuma. Tehnologicheskie vozmozhnosti metoda* (Hardening and cladding of a relativistic electron beam outside the vacuum. Technological capabilities of the method). Saarbrucken, LAPLAMBERT Academic Publishing, 2013. 317 p.
6. Poletika I.M., Ivanov Yu.F., Golkovski M.G., Krylova T.A., Teresov A.D., Makarov S.A. *Perspektivnye materialy*, 2011, no.1, pp. 71-81.
7. Fadeev S.N., Golkovski M.G., Korchagin A.I., Kuksanov N.K., Lavruhin A.V., Petrov S.E., Salimov R.A., Vaisman A.F. Technological applications of BINP industrial electron accelerators with focused beam extracted into atmosphere. *Radiation Physics and Chemistry*, 2000, no. 57, Issues 3-6, pp. 653-655.
8. Eunsub Yun, Yong Chan Kim, Sunghak Lee, Nack J. Kim. Correlation of microstructure with hardness and wear resistance in (TiC,SiC)/stainless steel surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, Vol. 35, Issue 3, pp. 1029-1038.
9. Dukhyun Nam, Kyuhong Lee, Sunghak Lee. Correlation of microstructure with hardness and wear resistance of carbide-reinforced ferrous surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, Vol. 39, Issue 11, pp. 2626-2634.
10. Seong-Hun Choo, Sunghak Lee, Soon-Ju Kwon. Effect of flux addition on the microstructure and hardness of TiC-reinforced ferrous surface composite layers fabricated by high-energy electron beam irradiation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999, Volume 30, Issue 12, pp. 3131-3141.
11. Jongmin Lee, Kwangjun Euh, Jun Cheol Oh, Sunghak Lee. Microstructure and hardness improvement of TiC/stainless steel surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, no. 323, Issue 1 – 2, pp. 251-259.
12. Kovalenko V.S. *Metallograficheskie reaktivy: spravochnik* (Metallographic reagents: a guide). Moscow, Metallurgija, 1981. 120 p.