

УДК 669.295.69 : 621.793

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-3-75-82

## Микродифракционный анализ фазового состава слоя, наплавленного проволокой на сталь Hardox 450

© 2017 г. **С.В. Коновалов, В.Е. Кормышев, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Е.В. Капралов**

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
(Самарский университет)

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), г. Новокузнецк

Институт сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН, г. Томск

Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ), г. Томск

Статья поступила в редакцию 20.04.16 г., доработана 03.07.16 г., подписана в печать 06.07.16 г.

Проведены одинарная и перекрестная (двойная) наплавки на сталь Hardox 450 порошковой проволокой состава C–Mn–Si–Cr–Nb–W и выполнен анализ микротвердости, фазового состава и дефектной субструктуры наплавленных слоев. Получен профиль микротвердости при удалении от поверхности. Показано, что в результате формирования наплавки образуется высокопрочный поверхностный слой с микротвердостью 10,2 ГПа. При большем удалении от поверхности наплавленного слоя микротвердость материала уменьшается до 6 ГПа. Увеличение количества наплавленных слоев до 2 приводит к утолщению упрочненного слоя. Показано, что величина микротвердости в нем практически не зависит от количества наплавленных слоев. Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии выполнено исследование фазового состава и дефектной субструктуры наплавленного слоя. Показано, что толщина упрочненного слоя изменяется от 6,0–6,5 до 7,5 мм при одинарной и двойной наплавках. Установлено, что повышение микротвердости наплавленного слоя объясняется формированием многофазной субмикро- и наноразмерной структуры, упрочнение которой обусловлено закалочным эффектом и наличием включений карбида ниобия субмикронных размеров, морфология которых существенным образом зависит от места образования в структуре стали. Выявлено, что зона контакта наплавки и основного металла подобна структуре исходной стали, однако упрочнение переходного слоя связано с наличием частиц карбидных фаз, сформированных элементами порошковой проволоки.

**Ключевые слова:** сталь Hardox 450, порошковая проволока, наплавка, фазовый состав, структура, микротвердость.

**Коновалов С.В.** – докт. техн. наук, доц., зав. кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского университета (443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34), гл. науч. сотр. управления научных исследований СибГИУ (654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42). E-mail: ksv@ssau.ru.

**Кормышев В.Е.** – инженер кафедры физики СибГИУ. E-mail: 89236230000@mail.ru.

**Громов В.Е.** – докт. физ.-мат. наук, проф., заведующий той же кафедрой. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.

**Иванов Ю.Ф.** – докт. физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотрудник ИСЭ СО РАН (634021, г. Томск, пр. Академический, 2/3), вед. науч. сотрудник лаборатории низкотемпературной плазмы НИ ТГУ (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36). E-mail: yufi55@mail.ru.

**Капралов Е.В.** – канд. техн. наук, инженер кафедры физики СибГИУ. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.

**Для цитирования:** Коновалов С.В., Кормышев В.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Капралов Е.В. Микродифракционный анализ фазового состава слоя, наплавленного проволокой на сталь Hardox 450 // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2017. No. 3. С. 75–82. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-3-75-82.

*Konovalov S.V., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kapralov E.V.*

### **Microdiffraction phase composition analysis of layer deposited on Hardox 450 steel by wire**

The paper describes single and crosswise (double) surfacing of Hardox 450 steel using the C–Mn–Si–Cr–Nb–W flux-cored wire, and the analysis of the microhardness, phase composition, and defective substructure of built-up layers. The microhardness profile is obtained at a distance from the surface. It is shown that a high-strength surface layer with a microhardness of 10,2 GPa is formed as a result of surfacing. Material microhardness decreases to 6 GPa at a greater distance from the surface of the built-up layer. An increase in the number of built-up layers up to 2 causes thickening of the hardened layer. The paper shows that the microhardness value of this layer does not depend on the number of built-up layers of the weld flux-cored wire. The paper describes the study of the phase composition and defective substructure of a built-up layer by transmission electronic diffraction microscopy methods. It is shown that the thickness of the hardened layer varies from 6,0–6,5 to 7,5 mm for single and double surfacing. It was found that the increase in the built-up layer microhardness was attributable to the formation of a multiphase submicro- and nanosized structure with hardening preconditioned by the hardening effect and the presence of submicron-sized niobium carbide inclusions, the morphology of which essentially depended on the place of formation in the steel structure. It was found that the contact area

between the surfacing and the base metal was similar to the structure of the original steel, but hardening of the transition layer occurred due to the presence of carbide phase particles formed by elements of the flux-cored wire.

**Keywords:** Hardox 450 steel, flux-cored wire, surfacing, phase composition, structure, microhardness.

**Konovalov S.V.** – Dr. Sci. (Tech.), Associate professor, Head of the Department of metals technology and aviation materials, Samara National Research University (443086, Russia, Samara, Moskovskoye Shosse, 34), Chief researcher, Scientific Department, Siberian State Industrial University (SibSIU) (654007, Russia, Novokuznetsk, Kirova str., 42). E-mail: ksv@ssau.ru.

**Kormyshev V.E.** – Engineer of the Physics Department, SibSIU. E-mail: 89236230000@mail.ru.

**Gromov V.E.** – Dr. Sci. (Phys. Math.), Prof., Head of the Physics Department, SibSIU. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.

**Ivanov Yu.F.** – Dr. Sci. (Phys. Math.), Prof., Leading researcher, Laboratory of plasma emission electronics, Institute of High Current Electronics Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IHCE SB RAS) (634021, Russia, Tomsk, Akademicheskii av., 2/3); Leading researcher, Laboratory of low-temperature plasma, National Research Tomsk State University (NR TSU) (634050, Russia, Tomsk, Lenina av., 36). E-mail: yufi55@mail.ru.

**Kapralov E.V.** – Cand. Sci. (Tech.), Engineer, Physics Department, SibSIU.

**Citation:** Konovalov S.V., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kapralov E.V. Mikrodifraktsionnyi analiz fazovogo sostava sloya, naplavlennogo provolokoi na stal' Hardox 450. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2017. No. 3. С. 75–82. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-3-75-82.

## Введение

Действие поверхностных контактных нагрузок на детали машин и механизмов приводит к их постепенному износу и выходу из строя. Для предотвращения этих процессов применяют различные методы модифицирования рабочих поверхностей изделий, к которым относятся плазменная наплавка порошковыми материалами, газотермическое напыление и др. [1–15] Одним из широко распространенных технологий создания материалов с повышенными износостойкими свойствами, а также восстановления изношенной поверхности является формирование наплавочных покрытий сварочными методами [15–23]. Основными факторами, определяющими их эксплуатационные характеристики, являются химический и фазовый составы материала покрытия. Для целенаправленного выбора материала покрытий с учетом условий их эксплуатации необходимо проведение подробных исследований их свойств и структуры.

Ранее в наших работах [21–23]:

- исследованы закономерности изменения структурно-фазовых состояний и трибологических свойств стали Hardox 400 при нанесении на нее износостойких покрытий, по своему составу соответствующих средне- и высоколегированным сталям и высокохромистым чугунам;

- установлено влияние химического состава исследованных порошковых проволок на уровень их физико-механических свойств;

- выявлены структурно-фазовые состояния покрытий, наплавленных порошковыми проволоками различного химического состава;

- определены механизмы упрочнения форми-

рованием субмикро- и наноразмерной структур, содержащих карбиды, бориды, карбобориды и боросилициды железа, хрома и ниобия.

Целью настоящего исследования, являющегося продолжением работ [21–23], был анализ микротвердости и фазового состава металла, наплавленного на сталь Hardox 450 наплавочной проволокой состава C—Mn—Si—Cr—Nb—W.

## Материалы и методы исследования

В качестве модифицируемого материала использовали сталь марки Hardox 450, элементный состав которой представлен ниже (химический состав металла в ковше, мас.%, остальное — железо):

C .....	0,19–0,26	Mo.....	0,25
Si.....	0,70	В.....	0,0004
Mn .....	1,60	P.....	0,025
Cr.....	0,25	S.....	0,010
Ni.....	0,25		

Наплавку осуществляли проволокой следующего химического состава, мас.%:

C .....	1,3	Nb.....	8,5
Mn .....	0,9	W.....	1,4
Si.....	1,1	Fe .....	ост.
Cr.....	7,0		

Наплавленный слой формировали проволокой при одинарной и перекрестной (двойной) наплавках.

Исследования фазового состава и дефектной субструктуры стали и наплавляемого металла осуществляли методами просвечивающей дифракционной электронной микроскопии [24, 25] (метод тонких фольг, прибор ЭМ-125). Фольги изготавливали из пластинок, вырезанных электроискровым методом из наплавленного металла (слой, расположенный на половине его толщины), зоны контакта наплавленного металла и стали. Утонение вырезанных таким образом пластинок до толщины  $\approx 200$  нм (тонкая фольга, необходимая для анализа методами просвечивающей электронной микроскопии) осуществляли распылением металла ионным пучком (аргон) на установке Ion Slicer, «JEOL». Механические свойства наплавленного слоя и стали характеризовали величиной микротвердости (градиент микротвердости, HVS-100A, метод Виккерса, нагрузка на индентор 5 Н).

## Результаты исследования и их обсуждение

Механические характеристики модифицированного слоя стали изучали путем построения профиля микротвердости (рис. 1). Анализ представленных данных показывает, что в результате формирования наплавки образуется высокопрочный поверхностный слой толщиной  $h \geq 6$  мм, средняя величина микротвердости которого составляет  $HV = 10,2$  ГПа. При большем удалении от

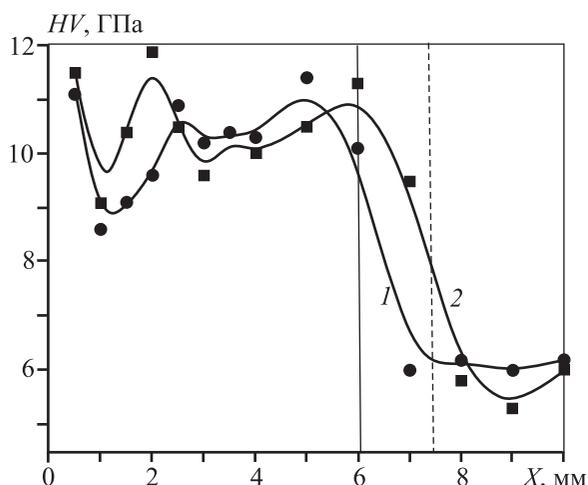


Рис. 1. Профиль микротвердости системы наплавленный слой/подложка

1 – одинарная наплавка; 2 – двойная наплавка  
Вертикальные линии указывают границу «наплавленный слой/подложка»: сплошная – для одинарной наплавки, штриховая – для двойной

поверхности наплавленного слоя к основе величина  $HV$  материала быстро падает, выходя на уровень  $\approx 6$  ГПа. Увеличение количества наплавленных слоев до 2 приводит лишь к небольшому утолщению (с 6,0 до 7,5 мм) упрочненного слоя, т.е. твердость упрочненного слоя практически не зависит от объема наплавленного металла.

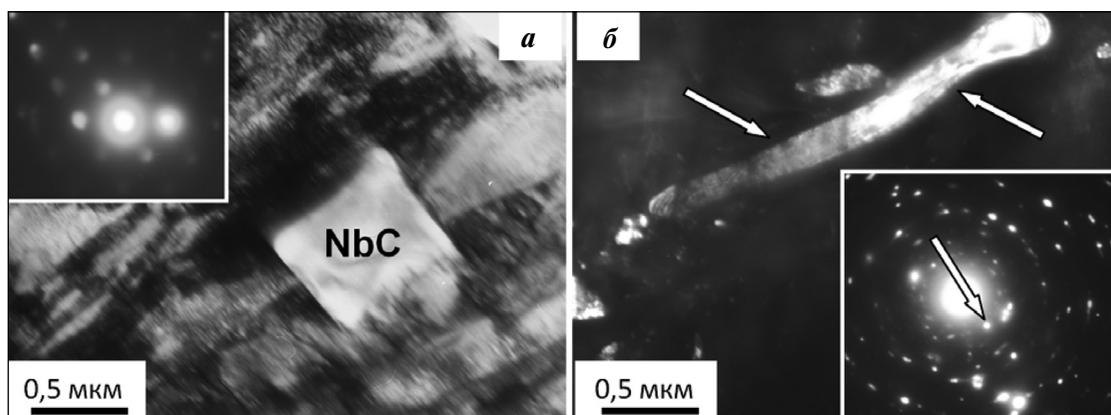
Таким образом, независимо от количества наплавляемого металла твердость полученного слоя толщиной до 7,5 мм превышает твердость металла–основы (сталь Хардокс 450) в  $\approx 1,7$  раза.

Наплавленный на сталь слой как при одинарной, так и при двойной наплавках является многофазным материалом. Основной фазой, как и следовало ожидать, является твердый раствор на основе  $\alpha$ -железа. Она представлена мартенситом, что указывает на относительно высокие скорости охлаждения наплавленного слоя. По морфологическому признаку выявленный мартенсит относится к пакетному (реечному) мартенситу [26]. Независимо от исследуемой наплавки (одинарной или двойной) методами микродифракционного анализа в объеме наплавленного слоя обнаруживается остаточный аустенит ( $\gamma$ -фаза, твердый раствор на основе кристаллической ГЦК-решетки железа), располагающийся в виде протяженных прослоек по границам кристаллов мартенсита.

Повышенное значение микротвердости наплавленного слоя обусловлено, с одной стороны, формированием закалочной структуры (мартенсит), а с другой – образованием включений второй фазы. Согласно результатам индентирования микроэлектронограмм основной упрочняющей фазой наплавленного слоя (как при одинарной, так и при двойной наплавках) являются частицы карбида ниобия. Размеры включений изменяются в пределах от 0,2 до 1,5 мкм. Форма частиц NbC весьма разнообразна и определяется местом их расположения: в объеме зерен они имеют преимущественно ограниченную форму (рис. 2, а), вдоль границ – формируют протяженные прослойки (рис. 2, б), в стыках границ зерен – принимают форму тройного растянутого узла (рис. 3).

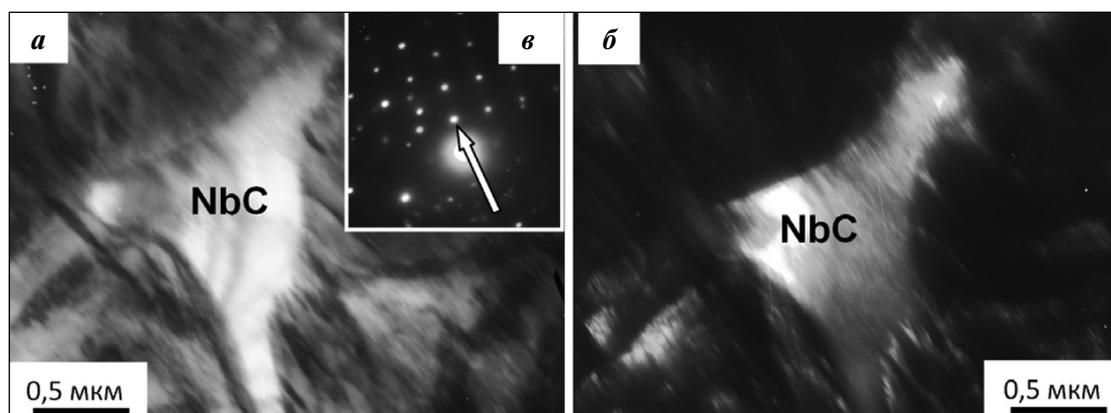
Структура переходной зоны, разделяющей объем основы (Hardox 450) и наплавленный слой, по морфологическим признакам близка к структуре исходной стали (рис. 4): выявляется мартенситная структура, характерное электронно-микроскопическое изображение которой представлено на рис. 4, а.

Переходный слой упрочнен выделениями вто-



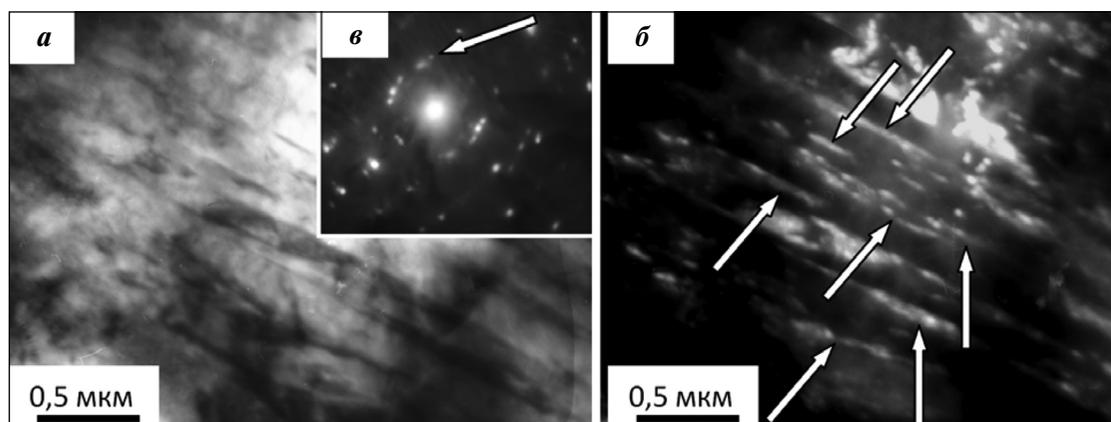
**Рис. 2.** Электронно-микроскопическое изображение структуры наплавки на стали Hardox 450

*a* – светлое поле (вставка – микроэлектронграмма с соответствующего участка фольги);  
*б* – темное поле (стрелками указан карбид ниобия), полученное в рефлексе  $[002]\text{NbC}$  (он указан стрелкой на вставке-микроэлектронграмме)



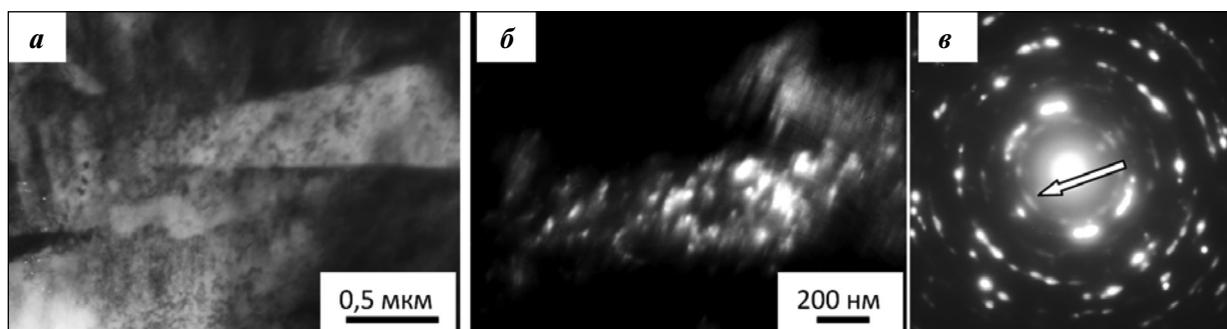
**Рис. 3.** Электронно-микроскопическое изображение структуры наплавки на стали Hardox 450

*a* – светлое поле;  
*б* – темное поле, полученное в рефлексе  $[002]\text{NbC}$  (он указан стрелкой на вставке-микроэлектронграмме *в*)



**Рис. 4.** Электронно-микроскопическое изображение структуры переходного слоя (двойная наплавка–сталь)

*a* – светлое поле;  
*б* – темное поле (стрелками указаны частицы карбида железа), полученное в близкорасположенных рефлексах  $[102]\text{Fe}_3\text{C} + [110]\alpha\text{-Fe}$  (они указаны стрелкой на вставке-микроэлектронграмме *в*)



**Рис. 5.** Электронно-микроскопическое изображение структуры переходного (наплавка–сталь) слоя (двойная наплавка)

*a* – светлое поле; *б* – темное поле, полученное в близкорасположенных рефлексах  $[121] \text{Cr}_3\text{C}_2 + [110] \alpha\text{-Fe}$ ; *в* – микроэлектрограмма (стрелкой указаны рефлексы, в которых получено темное поле)

рой фазы. На границах и в объеме кристаллов мартенсита методами темнопольного анализа обнаружены частицы карбида железа (цементита) (см. рис. 4, б). В переходном слое выявлено образование частиц специальных карбидов — карбидов хрома ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$  и  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ), карбида сложного состава типа  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  и, весьма редко, карбида вольфрама  $\text{WC}$ . Частицы специальных карбидов располагаются в объеме и на границах кристаллов мартенсита, имеют округлую форму, а их размеры изменяются в пределах от 30 до 50 нм. На рис. 5 приведено электронно-микроскопическое изображение структуры переходной зоны, демонстрирующее присутствие в стали частиц  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ .

В отдельных случаях в переходном слое образца с двойной наплавкой (вдоль границ зерен и кристаллов мартенсита) наблюдаются протяженные прослойки карбида ниобия подобно прослойкам карбидной фазы, выявленным в объеме наплавленного слоя (см. рис. 2, б).

Таким образом, выполненные исследования показывают, что структура переходного слоя независимо от одинарной или двойной наплавки по морфологическому признаку подобна структуре объема исходной стали. Различия заключаются в упрочнении переходного слоя частицами карбидных фаз, сформированных преимущественно элементами наплавочной проволоки.

## Заключение

Выполнены исследования фазового состава, дефектной субструктуры и механических свойств наплавки на стали Hardox 450, сформированной порошковой проволокой. Установлено, что независимо от одинарной или двойной

наплавки микротвердость полученного слоя превышает таковую металла основы (сталь Хардокс 450) в  $\approx 1,7$  раза. Толщина упрочненного слоя при одинарной наплавке составляет 6,0–6,5 мм, при двойной — увеличивается до 7,5 мм. Показано, что повышенная микротвердость наплавленного слоя вызвана:

— формированием многофазной субмикро- и наноразмерной структуры, упрочнение которой обусловлено закалочным эффектом (формирование мартенситной структурой  $\alpha$ -матрицы);

— наличием включений преимущественно карбида ниобия субмикронных размеров, морфология которых существенным образом зависит от места образования (границы и стыки границ зерен и кристаллов мартенсита, объем зерна) в структуре стали.

Структура переходного слоя (зона контакта наплавки и основного металла) подобна структуре объема исходной стали. Различия заключаются в упрочнении переходного слоя частицами карбидных фаз, сформированных элементами наплавочной порошковой проволоки.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-00065).*

## Литература

1. Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Skryleva E.A., Sviridova T.A., Kiryukhantsev-Korneev P.V. Conditions for formation of MAX phase  $\text{Cr}_2\text{AlC}$  in electrospark coatings deposited onto titanium alloy // Surf. Coat. Technol. 2016. Vol. 298. P. 15–23. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.04.058.
2. Shtansky D.V., Sheveiko A.N., Petrzhik M.I., Kiryukhantsev-Korneev F.V., Levashov E.A., Leyland A., Yerokhin A.L., Matthews A. Hard tribological Ti–B–N, Ti–Cr–B–N,

- Ti—Si—B—N and Ti—Al—Si—B—N coatings // Surf. Coat. Technol. 2005. Vol. 200. No. 1—4. P. 208—212.
3. Лозован А.А., Франгулов С.В., Чулков Д.В. Исследование состава и структуры многослойных нанопокровтий, напыленных на внутренние поверхности труб импульсным лазерным осаждением // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. No. 6. С. 88—91.
  4. Лигачев А.Е., Колобов Ю.Р., Жидков М.В., Голосов Е.В., Потемкин Г.В., Ремнев Г.Е. Влияние импульсных ионных пучков на изменение субмикроструктурной структуры приповерхностных слоев аустенитной стали // Физика и химия обработки материалов. 2015. No. 1. С. 19—25.
  5. Ramazanov K.N., Zolotov I.V., Khusainov Y.G., Khusnutdinov R.F. Improving the operating properties of parts of titanium alloys by surface hardening in high density plasma of glow discharge // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. Vol. 652. No. 1, art. No. 012055. DOI: 10.1088/1742-6596/652/1/012055
  6. Budilov V.V., Ramazanov K.N., Zolotov I.V., Khucnutdinov R.F., Starovoitov S.V. Ion nitriding of titanium alloys with a hollow cathode effect application // J. Eng. Sci. Technol. Rev. 2015. Vol. 8. No. 6. (Spec. iss.). P. 22—24.
  7. Блинков И.В., Волхонский А.О., Аникин В.Н., Скрылева Е.А. Мультислойные наноструктурные покрытия TiAlN/ZrNbN/CrN, получаемые методом ARC-PVD, для режущего твердосплавного инструмента // СТИН. 2012. No. 5. С. 18—24.
  8. Blinkov I.V., Volkhonskii A.O., Kuznetsov D.V., Skryleva E.A. Investigation of structure and phase formation in multilayer coatings and their thermal stability // J. Alloys Compounds. 2014. Vol. 586. No. 1. P. S381—S386. DOI: 10.1016/j.jallcom.2012.11.159
  9. Levashov E.A., Zamulaeva E.I., Pogozhev Y.S., Kurbatkina V.V. Nanoparticle dispersion strengthened WC—C based coatings on Ti-alloy produced by sequential chemical reaction assisted pulsed electrospark deposition // Plasma Processes and Polymers. 2009. Vol. 6. No. 1. P. S102—S106. DOI: 10.1002/ppap.200930401.
  10. Петржик М.И., Левашов Е.А. Современные методы изучения функциональных поверхностей перспективных материалов в условиях механического контакта // Кристаллография. 2007. Т. 52. No. 6. С. 1002—1010.
  11. Левашов Е.А., Штанский Д.В., Кирюханцев Корнеев Ф.В., Петржик М.И. Современное состояние в области получения и исследования функциональных наноструктурированных покрытий // Проблемы черн. металлургии и материаловедения. 2009. No. 1. С. 65—88.
  12. Elagina O.Y., Gusev V.M., Buklakov A.G., Gantimirov B.M. Study of the wear-resistance of coatings from clad powders under sliding friction with boundary lubrication // J. Frict. Wear. 2015. Vol. 36. No. 3. P. 218—222. DOI: 10.3103/S1068366615030046.
  13. Okovity V.A., Shevtsov A.I., Okovity V.V., Astashynski V.M., Kostyukevich E.A. Parameters optimization for plasma spraying and pulsed plasma treatment of surface layers of gas-thermal composite coatings based on multifunctional oxide ceramics // High Temp. Mater. Process. 2014. Vol. 18. No. 1—2. P. 45—62. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2015014363.
  14. Arai M., Suidzu T. Porous ceramic coating for transpiration cooling of gas turbine blade // J. Thermal Spray Technol. 2013. Vol. 22. No. 5. P. 690—698. DOI: 10.1007/s11666-013-9883-1.
  15. Geras'kina V.V., Baldaeva S.L., Puzryakova A.F., Baldaev L.K.H. Increasing the service life of components by gas thermal spraying of nanostructured materials // Weld. Int. 2011. Vol. 25. No. 3. P. 221—223. DOI: 10.1080/09507116.2010.540876.
  16. Zhu Q., Lei Y.-C., Chen X.-Z., Ren W.-J., Ju X., Ye Y.-M. Microstructure and mechanical properties in TIG welding of CLAM steel // Fusion Eng. Design. 2011. Vol. 86. No. 4—5. P. 407—411. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2011.03.070.
  17. Kononov S., Chen X., Sarychev V., Nevskii S., Gromov V., Trtica M. Mathematical modeling of the concentrated energy flow effect on metallic materials // Metals. 2017. Vol. 7. No 1. DOI: 10.3390/met7010004.
  18. Lei Y.-c., Yuan W.-j., Chen X.-z., Zhu F., Cheng X.-n. In-situ weld-alloying plasma arc welding of SiCp/Al MMC // Trans. Nonferr. Met. Soc. China (Eng. Ed.). 2007. Vol. 17. No 2. P. 313—317. DOI: 10.1016/S1003-6326(07)60091-0.
  19. Громов В.Е., Горбунов С.В., Иванов Ю.Ф., Воробьев С.В., Коновалов С.В. Формирование поверхностных градиентных структурно-фазовых состояний при электронно-пучковой обработке нержавеющей стали // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. No. 10. С. 62—67.
  20. Poletika I.M., Krylova T.A., Tetyutskaya M.V., Makarov S.A. Formation of the structure of wear-resisting coatings in electron beam deposition of tungsten carbide // Weld. Int. 2013. Vol. 27. No. 7. P. 508—515. DOI: 10.1080/09507116.2012.715946.
  21. Коновалов С.В., Кормышев В.Е., Иванов Ю.Ф., Тересов А.Д. Электронно-пучковая модификация упрочненного слоя, сформированного на стали Hardox 450 электроконтактной наплавкой проволоки системы Fe—C—V—Cr—Nb—W // Письма о материалах. 2016. Т. 6. No. 4. С. 350—354.

22. Капралов Е.В., Райков С.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Ващук Е.С., Иванов Ю.Ф. Структурно-фазовые состояния и свойства покрытий, наплавленных на поверхность стали порошковыми проволоками // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. No. 10. С. 1266—1272.
23. Popova N., Nikonenko E., Ivanov Yu., Gromov V., Budovskikh E., Raikov S., Kapralov E., Vashuk E. Structure and properties of wear-resistant weld deposit formed on martensitic steel using the electric-arc method // Adv. Mater. Res. 2014. Vol. 1013. P. 194—199.
24. Williams D.B. Practical analytical electron microscopy in materials science. USA. Deerfield Beach, FL: Verlag Chemic Int, 2004.
25. Сундо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия. М: Техносфера, 2006.
26. Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращение в железе и стали. М.: Наука, 1977.
- Multilayer TiAlN/ZrNbN/CrN nanocoatings obtained by the Arc-PVD method for hard-alloy cutting tools. *Russ. Eng. Research*. 2012. Vol. 32. No. 11—12. P. 740—745. DOI: 10.3103/S1068798X12110056
8. Blinkov I.V., Volkhonskii A.O., Kuznetsov D.V., Skryleva E.A. Investigation of structure and phase formation in multilayer coatings and their thermal stability. *J. Alloys Compounds*. 2014. Vol. 586. No. 1. P. S381—S386. DOI: 10.1016/j.jallcom.2012.11.159
9. Levashov E.A., Zamulaeva E.I., Pogozhev Y.S., Kurbatkina V.V. Nanoparticle dispersion strengthened WC—C based coatings on Ti-alloy produced by sequential chemical reaction assisted pulsed electrospark deposition. *Plasma Processes and Polymers*. 2009. Vol. 6. No. 1. P. S102—S106. DOI: 10.1002/ppap.200930401.
10. Petrzehik M.I., Levashov E.A. Modern methods for investigating functional surfaces of advanced materials by mechanical contact testing. *Crystallogr. Rep.* 2007. Vol. 52. No. 6. P. 966—974.
11. Levashov E.A., Shtanskij D.V., Kirjuhancev Korneev F.V., Petrzehik M.I. Современное состояние в области получения и исследования функциональных наноструктурированных покрытий [Current status in the field of preparation and research of functional nanostructured coatings]. *Problemy chernoj metallurgii i materialovedeniya*. 2009. No. 1. P. 65—88.
12. Elagina O.Y., Gusev V.M., Buklakov A.G., Gantimirov B.M. Study of the wear-resistance of coatings from clad powders under sliding friction with boundary lubrication. *J. Frict. Wear*. 2015. Vol. 36. No. 3. P. 218—222. DOI: 10.3103/S1068366615030046.
13. Okovity V.A., Shevtsov A.I., Okovity V.V., Astashynski V.M., Kostyukevich E.A. Parameters optimization for plasma spraying and pulsed plasma treatment of surface layers of gas-thermal composite coatings based on multifunctional oxide ceramics. *High Temp. Mater. Process.* 2014. Vol. 18. No. 1—2. P. 45—62. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2015014363.
14. Arai M., Suidzu T. Porous ceramic coating for transpiration cooling of gas turbine blade. *J. Thermal Spray Technol.* 2013. Vol. 22. No. 5. P. 690—698. DOI: 10.1007/s11666-013-9883-1.
15. Geras'kina V.V., Baldaeva S.L., Puzryakova A.F., Baldaev L.K.H. Increasing the service life of components by gas thermal spraying of nanostructured materials. *Weld. Int.* 2011. Vol. 25. No. 3. P. 221—223. DOI: 10.1080/09507116.2010.540876.
16. Zhu Q., Lei Y.-C., Chen X.-Z., Ren W.-J., Ju X., Ye Y.-M. Microstructure and mechanical properties in TIG welding of CLAM steel. *Fusion Eng. Design*. 2011. Vol. 86. No. 4—5. P. 407—411. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2011.03.070.

## References

1. Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Skryleva E.A., Sviridova T.A., Kiryukhantsev-Korneev P.V. Conditions for formation of MAX phase Cr<sub>2</sub>AlC in electrospark coatings deposited onto titanium alloy. *Surf. Coat. Technol.* 2016. Vol. 298. P. 15—23. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.04.058.
2. Shtansky D.V., Sheveiko A.N., Petrzehik M.I., Kiryukhantsev-Korneev F.V., Levashov E.A., Leyland A., Yerokhin A.L., Matthews A. Hard tribological Ti—B—N, Ti—Cr—B—N, Ti—Si—B—N and Ti—Al—Si—B—N coatings. *Surf. Coat. Technol.* 2005. Vol. 200. No. 1—4. P. 208—212.
3. Lozovan A.A., Frangulov S.V., Chulkov D.A. Structure and composition analysis of multilayer nanocoating deposited onto inner surfaces of tubes by pulsed laser deposition. *J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2010. Vol. 4. No. 3. P. 530—533.
4. Ligachev A.E., Kolobov Yu.R., Zhidkov M.V., Golosov E.V., Potemkin G.V., Remnev G.E. Pulsed ion beam induced changes in a submicrocrystalline structure of the near surface layers of austenite steel. *Inorgan. Mater.: Appl. Res.* 2016. Vol. 7. No. 3. P. 325—329.
5. Ramazanov K.N., Zolotov I.V., Khusainov Y.G., Khusnutdinov R.F. Improving the operating properties of parts of titanium alloys by surface hardening in high density plasma of glow discharge. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2015. Vol. 652. No. 1, art. No. 012055. DOI: 10.1088/1742-6596/652/1/012055
6. Budilov V.V., Ramazanov K.N., Zolotov I.V., Khucnutdinov R.F., Starovoitov S.V. Ion nitriding of titanium alloys with a hollow cathode effect application. *J. Eng. Sci. Technol. Rev.* 2015. Vol. 8. No. 6. (Spec. iss.). P. 22—24.
7. Blinkov I.V., Volkhonskii A.O., Anikin V.N., Skryleva E.A.

17. *Konovalov S., Chen X., Sarychev V., Nevskii S., Gromov V., Trtica M.* Mathematical modeling of the concentrated energy flow effect on metallic materials. *Metals*. 2017. Vol. 7. No 1. DOI: 10.3390/met7010004.
18. *Lei Y.-c., Yuan W.-j., Chen X.-z., Zhu F., Cheng X.-n.* In-situ weld-alloying plasma arc welding of SiCp/Al MMC. *Trans. Nonferr. Met. Soc. China* (Eng. Ed.). 2007. Vol. 17. No 2. P. 313—317. DOI: 10.1016/S1003-6326(07)60091-0.
19. *Gromov V.E., Gorbunov S.V., Ivanov Y.F., Vorobiev S.V., Konovalov S.V.* Formation of surface gradient structural-phase states under electron-beam treatment of stainless steel. *J. Surf. Invest.* 2011. Vol. 5. No. 5. P. 974—978.
20. *Poletika I.M., Krylova T.A., Tetyutskaya M.V., Makarov S.A.* Formation of the structure of wear-resisting coatings in electron beam deposition of tungsten carbide. *Weld. Int.* 2013. Vol. 27. No. 7. P. 508—515. DOI: 10.1080/09507116.2012.715946.
21. *Konovalov S.V., Kormyshev V.E., Ivanov Y.F., Teresov A.D.* Electron-beam processing of the hardened layer formed on Hardox 450 steel electric-wire welding system Fe—C—V—Cr—Nb—W. *Lett. Mater.* 2016. Vol. 6. No. 4. P. 350—354. DOI: 10.22226/2410-3535-2016-4-350-354.
22. *Kapralov E., Raikov S., Budovskikh E., Gromov V., Vashuk E., Ivanov Yu.* Structural phase states and properties of coatings welded onto steel surfaces using powder. Bulletin of the Russian academy of sciences. *Physics*. 2014. Vol. 78. No. 10. P. 1015—1021.
23. *Popova N., Nikonenko E., Ivanov Yu., Gromov V., Budovskikh E., Raikov S., Kapralov E., Vashuk E.* Structure and properties of wear-resistant weld deposit formed on martensitic steel using the electric-arc method. *Adv. Mater. Res.* 2014. Vol. 1013. P. 194—199.
24. *Williams D.B.* Practical analytical electron microscopy in materials science. USA. Deerfield Beach, FL: Verlag Chemic Int, 2004.
25. *Sindo D., Oikava T.* Analiticheskaja prosvetchivajushhaja jelektronnaja mikroskopija [Analytical transmission electron microscopy]. Moscow: Tehnosfera, 2006.
26. *Kurdjumov V.G., Utevskij L.M., Jentin R.I.* Prevrashhenija v zheleze i stali [Transformations in the iron and steel]. Moscow: Nauka, 1977.