СТРУКТУРА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ после высокоэнергетического воздействия твч*

Ю.С. ЧЁСОВ¹, канд. техн. наук, доцент Е.А. ЗВЕРЕВ¹, канд. техн. наук В.В. ИВАНЦИВСКИЙ¹, доктор техн. наук, доцент В.Ю. СКИБА¹, канд. техн. наук, доцент Н.В. ПЛОТНИКОВА¹, канд. техн. наук, доцент Д.В. ЛОБАНОВ², доктор техн. наук, доцент (¹НГТУ, г. Новосибирск, ² БрГУ, г. Братск)

> Поступила: 22 сентября 2014 Рецензирование: 06 октября 2014 Принята к печати: 05 ноября 2014

Зверев Е.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, e-mail: egor z@ngs.ru

В работе представлены результаты исследования влияния высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты на качество плазменных покрытий из высокохромистого порошкового чугуна. Приведены результаты металлографических, рентгенофазовых и энергодисперсионных исследований структуры износостойких плазменных покрытий до и после индукционного нагрева. Показано, что после дополнительного высокотемпературного воздействия в структуре покрытий повысилась равномерность распределения микротвердости по глубине слоя: после плазменного напыления величина доверительного интервала составляла 1,7...2,8 ГПа; после воздействия ВЭН ТВЧ – доверительный интервал варьировался в пределах 0,5...1,3 ГПа. Выявлено, что в выбранной области режимов индукционного нагрева в структуре плазменных покрытий сохраняется карбидная составляющая. Установлен рациональный режим повторного нагрева TBЧ (удельная мощность источника $q_{\mu} = (3, 0...3, 2) \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$; относительная скорость перемещения детали $V_{\mu} = 60...80 \text{ мм/с}$, при котором наблюдается уменьшение пористости плазменного покрытия с 12 до 1 %.

Ключевые слова: качество, высокохромистый чугун, плазменные покрытия, структура, высокоэнергетическое воздействие, токи высокой частоты.

Введение

Обеспечение требуемого уровня качества поверхностного слоя, а следовательно, и эксплуатационных свойств деталей машин является одной из приоритетных задач современной технологии машиностроения. Эта проблема особенно актуальна применительно к деталям, работающим в условиях тяжелых режимов нагружения. Среди наиболее распространенных в машиностроении методов поверхностного упрочнения деталей заметное место принадлежит процессу плазменного напыления износостойких покрытий [1–3]. Несмотря на ряд очевидных достоинств, которые присущи данному методу, ему свойственны и недостатки, обусловленные нестабильностью показателей качества напыленного слоя: химического и фазового состава структуры, степени расплавленности порошкового материала, количества и размера пор, а также характера границы между покрытием и основой [4–6]. Эти показатели закономерно предопределяют адгезионную

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, по государственному заданию № 2014/138, проект № 257.

прочность покрытий (прочность сцепления с основой), знак, величину и закономерность распределения остаточных напряжений в слое покрытия. Так, относительно невысокий уровень адгезионной прочности при высоких контактных давлениях может являться причиной нарушения сплошности поверхности плазменных покрытий в виде отслоений и сколов частиц покрытия в процессе эксплуатации оборудования, что, естественно, ограничивает его технический ресурс.

С целью увеличения адгезионной прочности, уменьшения пористости, ликвидации нерасплавленных частиц порошка в структуре покрытий и обеспечения равномерного распределения микротвердости по глубине упрочненного слоя используют повторное оплавление покрытия концентрированными источниками энергии [7–9].

Анализ технологических возможностей основных методов обработки концентрированными источниками энергии (электродуговой, электронно-лучевой, лазерный, плазменный и индукционный) [10, 11], которые можно использовать для повторного высокоэнергетического воздействия на структуру плазменных покрытий, показал, что при повторной обработке токопроводящих плазменных покрытий явным преимуществом обладает высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ) [12, 13]. Характерной особенностью этого процесса является то, что источник нагрева – объемный, и выделение энергии осуществляется в поверхностном слое, толщина которого определяется частотой тока, удельным электрическим сопротивлением и теплофизическими характеристиками материала покрытия. Выбор соответствующей частоты генератора позволяет выполнять одновременный нагрев во всей толщине нанесенного покрытия.

Цель настоящей работы – исследование структуры плазменного покрытия из высокохромистого чугуна марки ПГ-С27 после повторного оплавления ВЭН ТВЧ.

1. Методика экспериментального исследования

Покрытия наносили методом плазменного напыления на подложки размером 100×10×10 мм, изготовленные из стали 20. Предварительная подготовка образцов производилась на обрабатывающем центре *DMC* 635 и плоскошлифовальном станке 3Г71. С целью активации поверхности образцы подвергались струйноабразивной очистке острогранными частицами электрокорунда марки 13А, в результате чего была сформирована поверхность с шероховатостью Rz = 50...75 мкм. Контроль размеров осуществлялся на профилографе-профилометре *Form Talysurf Series* 2.

В качестве материала для напыления использовали промышленный порошок хромистого чугуна марки ПГ-С27 с фракционным размером 50...100 мкм [14]. Обработка производилась на установке «Киев-7» плазмотроном ПУН-8 мощностью 40 кВт [15, 16]. Режимы напыления: сила тока дуги плазмотрона I = 140 А; напряжение U = 140 В; расход плазмообразующего газа (воздуха) G = 18 л/мин при давлении P = 0,4 МПа; дистанция напыления L = 110 мм; скорость перемещения плазмотрона V = 12 м/мин.

Оплавление поверхности образцов осуществлялось на экспериментальной установке, привод главного движения которой имеет плавное регулирование скорости [17]. Источником энергии выбран ламповый генератор марки ВЧГ 6-60/0.44 с рабочей частотой тока 440·10³ Гц. Процесс нагрева осуществлялся по глубинной схеме (глубина выделения энергии 0,6...0,8 мм) непрерывно-последовательным способом. При упрочнении использовался индуктор петлевого типа, оснащенный ферритовым магнитопроводом марки N87 (для работы в диапазоне частот до 500 кГц) с магнитной проницаемостью µ_i = 2200. Удельная мощность нагрева варьировалась в пределах $q_{\mu} = (2, 8...3, 4) \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$, а скорость перемещения детали $V_{\mu} = (20...120) \text{ мм/с}.$ Ширина активного провода индуктора составляла $R_{\mu} = 2$ мм, обработка осуществлялась с зазором $\Delta = 0, 1 \dots 0, 2$ мм.

Для определения фазового состава исходного порошка и нанесенного покрытия использовали рентгеновский дифрактометр ARL X`TRA. Источником рентгеновского излучения являлась медная трубка. Дифракционные картины регистрировали с шагом $\Delta 2\theta$ и временем накопления 10 с на одну точку. Определение пористости покрытия осуществлялось микроскопическим (металлографическим) методом [18]. Металлографические исследования структуры выполняли

CM

ТЕХНОЛОГИЯ

на световых микроскопах NIKON Eclipse MA100 и Carl ZeissAxio Observer A1m и растровом электронном микроскопе модели Carl Zeiss EVO 50 XVP. Металлографические шлифы готовили по стандартной технологии, основанной на механическом шлифовании и полировании анализируемого материала [19]. Для химического травления покрытий использовался реактив FeCl + HNO₃ + HCl (хлорного железа - 20 г, азотной кислоты – 1-2 мл, соляной кислоты – 100 мл). Микротвердость Н_и покрытий определяли на приборе Wolpert Group 402MVD. Нагрузка на алмазный индентор составляла 0,98 Н. Энергодисперсионный анализ проводился на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP с использованием приставки Inca X-Act.

2. Результаты исследований и их обсуждение

При исследовании влияния режимов ВЭН ТВЧ на плазменные покрытия установлено, что в исследуемом диапазоне условий индукционного нагрева формируются различные модификации структуры: при минимальных значениях удельной мощности и максимальных значениях скорости перемещения образцов относительно индуктора наблюдается неполное оплавление по глубине покрытия, структура которого практически не отличается от исходного состояния. В то же время при высокой мощности и низких скоростях перемещения образцов формируется структура с излишней степенью термического воздействия. Проведенные исследования позволили установить область наиболее рациональных режимов повторного высокоэнергетического индукционного воздействия – диапазон удельной мощности от $3,0.10^8$ до $3,2.10^8$ BT/м² при относительной скорости перемещения от 60 до 80 мм/с. При обработке плазменных покрытий в установленном рациональном диапазоне режимов формируется равномерно проплавленная структура покрытий. На рис. 1 показаны структуры покрытий после напыления плазмой (рис. 1, *a*) (режимы: I = 140 A, G = 18 л/мин, L = 110 мм) и дополнительного воздействия на нее ВЭН ТВЧ ($q_{\mu} = 3,1\cdot 10^8$ Вт/м², $V_{\mu} = 80$ мм/с). Отчетливо видно, что при дополнительном воздействии ВЭН ТВЧ в структуре плазменного покрытия происходят существенные изменения







(рис. 1, δ): значительно уменьшено количество пор и нерасплавленных частиц порошка, отсутствуют участки с несплошностью на переходной границе. Экспериментальные данные показали, что пористость исходной структуры составляла $\Pi = 12$ %. Оплавление покрытия ВЭН ТВЧ позволило достичь значения $\Pi = 1$ %.

Результаты металлографического анализа подтверждаются и распределением микротвердости по глубине слоя покрытия (рис. 2).

В отличие от исходной структуры (рис. 2, *a*) (колебания значений микротвердости в пределах доверительного интервала достигают 1,7...2,8 ГПа) после воздействия ВЭН ТВЧ распределение микротвердости более равномерное (рис. 2, δ) (доверительный интервал варьируется в пределах 0,5...1,3 ГПа), хотя в целом максимальная микротвердость покрытия осталась на уровне $H_{\mu} \approx 8,5$ ГПа.

В то же время нельзя исключить и отрицательного влияния процесса ВЭН ТВЧ. В частности,





 а – после плазменного напыления; б – после плазменного напыления и последующего оплавления ВЭН ТВЧ

высокая температура нагрева может привести к изменению химического и фазового составов, а также к росту остаточных напряжений в покрытиях, что приведет к снижению уровня эксплуатационных свойств деталей машин.

Микроструктурный анализ исходных покрытий после химического травления позволил выявить наличие участков различной степени травимости (рис. 3, *a*). Мы предполагаем, что светлые частицы содержат в качестве основной фазы γ -железо, а темные вытравленные – α -железо. Кроме того, по данным рентгенофазового анализа (рис. 4) установлено, что в карбидах M_7C_3 в качестве металла преимущественно выступают атомы хрома (рис. 3, *б*) [14].

Микроструктура равномерно проплавленного ВЭН ТВЧ покрытия после химического травления при разной степени увеличения представлена на рис. 5. В стальной основе наблюдается зона термического влияния порядка 50 мкм с характерной структурой феррита видманштеттова типа (рис. 5, *a*). Кроме того, на границе раздела в сторону покрытия прорастают дендритные кристаллы, образование которых свидетельствует о равномерном расплавлении всего покрытия вплоть до стальной основы.

Структура оплавленного покрытия представляет собой структуру заэвтектического чугуна, состоящую из мелкодисперсной эвтектики ледебурита и первичных кристаллов карбида (рис. 5, δ). Из литературных данных известно, что увеличение в чугунах содержания хрома выше 10 % приводит к образованию в их структуре первичного карбида тригонального типа (Cr, Fe)₇C₃ [20]. Проведенный нами энергодисперсионный анализ показал, что основными элементами, входящими в исследуемую фазу (рис. 6, *a*), являются железо, хром и углерод (рис. 6, *б*, *в*).







Рис. 3. Микроструктура исходного покрытия после химического травления:

a — формирование в покрытии частиц различной травимости; δ — сохранение карбидов Cr_7C_3 в структуре частиц материала покрытия



Рис. 4. Дифракционная картина покрытия сформированного методом плазменного напыления



б

- *Рис.* 5. Плазменное покрытие после воздействия ВЭН ТВЧ:
- *а* граница раздела «основной металлпокрытие»; *б* – тонкая структура покрытия

Как правило, при кристаллизации хромистокарбидной эвтектики карбиды типа M₇C₃ не образуют непрерывную фазу, а располагаются в виде изолированных тригональных карбидов. Кроме того, в работе [21] показана особенность формирования первичных сложных карбидов в зависимости от условий охлаждения при кристаллизации. Увеличение скорости охлаждения приводит к образованию крупных, сильноразОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ



ветвленных кристаллов карбида. При обработке ВЭН ТВЧ реализуется режим ускоренного охлаждения за счет быстрого теплоотвода в глубь стальной основы, что приводит к расщеплению кристаллов карбида и их разрастанию в виде «веера». В поперечных сечениях карбиды выглядят в виде гексагональных или тригональных призм, а разрез «веера» представляет собой комбинацию сечений нескольких тригональных призм (см. рис. 5).









в

а – структура карбидного включения; *б* – спектр хрома; *в* – спектр железа

№ 4 (65) 2014

Выводы

Таким образом, в результате проведения комплекса исследований было установлено следующее: полученные после повторного индукционного нагрева структуры плазменно напыленных слоев обладают более качественными показателями. Об этом свидетельствуют снижение пористости (с 12 % исходной структуры после плазменного напыления до 1 %), отсутствие нерасплавленных частиц и высокое качество границы между покрытием и основой. При этом распределение микротвердости по всей глубине упрочненного слоя практически равномерно, хотя ее уровень и не превышает максимально достигнутого значения на стадии плазменного напыления покрытий. Повторное высокотемпературное воздействие на поверхность плазменных покрытий существенно влияет на характер исходной структуры: видоизменяется карбидная фаза и формируется дендритная структура.

Дальнейшие исследования будут направлены на определение износостойкости полученных покрытий. Ожидается увеличение уровня износостойкости плазменных покрытий после оплавления ВЭН ТВЧ.

Список литературы

1. *Cartier M.* Handbook of surface treatments and coatings. – New York: ASME Press, 2003. – 464 p. – ISBN 978-1-86058-375-9.

2. Handbook of thermal spray technology / J.R. Davis, ed. – Ohio, USA: ASM International, Materials Park, 2004. – 338 p. – ISBN-10 0-87170-795-0. – ISBN-13 978-0-87170-795-6.

3. ASM Handbook. Vol. 5A: Thermal Spray Technology / R.C. Tucker Jr, ed. – Ohio, USA: ASM International, Materials Park, 2013. – 412 p. – ISBN: 978-1-61503-996-8.

4. *Пузряков А.Ф.* Теоретические основы технологии плазменного напыления. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 360 с.

5. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская. – Киев: Наукова думка, 1987. – 544 с.

6. Чёсов Ю.С., Зверев Е.А., Плохов А.В. Структура плазменных износостойких покрытий из порошкового материала марки ПГ-С27 // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 1 (46). – С. 14–18.

7. *Nielsen S.E.* Laser fusing-a technique for surface improvement // Industrial Laser Solutions. – 2009. – Vol. 24, iss. 12. – P. 13.

8. Thermal modification of zinc-aluminum coated steel using lasers / R. Mathew, P. Stoddart, D. Nolan, Y. Durandet // Proceedings of the 30th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO 2011). – Orlando, Florida, United States, 2011. – P. 457–462.

9. Методы повышения эксплуатационных свойств плазменных покрытий / Ю.С. Чёсов, П.В. Трегубчак, Е.А. Зверев, И.А. Ерохин // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 10 Всероссийской научно-практической конференции. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – С. 23–25.

10. *Fauchais P.L., Heberlein J. V.R., Boulos M.I.* Thermal Spray Fundamentals. – New York: Springer US Publ., 2014. – 1566 p. – doi: 10.1007/978-0-387-68991-3. – Print ISBN 978-0-387-28319-7.

11. Advanced Tribology: Proceedings of CIST2008 & ITS-IFToMM2008 / Jianbin Luo, Yonggang Meng, Tianmin Shao, Qian Zhao. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag; Beijing: Tsinghua University Press, 2009. – 1056 p.

12. Иванцивский В.В., Скиба В.Ю., Степанова Н.П. Методика назначения рациональных режимов поверхностной закалки сталей с использованием концентрированных источников нагрева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. – № 4 (33). – С. 17–19.

13. Анализ напряженно-деформированного состояния материала при высокоэнергетическом нагреве токами высокой частоты / В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 3 (64). – С. 90–102.

14. Особенности микроструктуры износостойких покрытий / В.С. Веселов, Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, П.В. Трегубчак, В.В. Базаркина, В.С. Ложкин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 4 (49). – С. 35–37.

15. Чёсов Ю.С., Зверев Е.А. Исследование износостойкости покрытий, нанесенных методом плазменного напыления // Научный вестник НГТУ. – 2008. – № 3 (32). – С. 175–181.

16. Чёсов Ю.С., Зверев Е.А. Методика нанесения плазменных износостойких покрытий // Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 2 (55). – С. 156–165.

17. Скиба В.Ю. Повышение эффективности технологического процесса обработки деталей машин при интеграции абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.03.01 / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2008. – 257 с.

18. Методы исследований материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов,

ТЕХНОЛОГИЯ

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

А.О. Токарев, В.И. Синдеев. – М.: Мир, 2004. – 384 с. – ISBN 5-03-003572-9.

19. ASM Handbook. Vol. 9: Metallography and Microstructures / G.F. Vander Voort, ed. – ASM International Publ., 2004. – 1184 p. – ISBN 978-0-87170-706-2.

20. Гарбер М.Е. Износостойкие белые чугуны. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2010. – 281 с.

21. *Бунин К.П., Малиночка Я.Н., Таран Ю.Н.* Основы металлографии чугуна. – М.: Металлургия, 1969. – 420 с.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE) N 4(65), October – December 2014, Pages 11–18

Structure of wear resistant plasma coatings after high-energy treatment using high-frequency currents

Chesov Yu. S. ¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: chesov@ngs.ru Zverev E. A. ¹, Ph.D. (Engineering), e-mail: egor_z@ngs.ru Ivancivsky V. V. ¹, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ivancivskij@corp.nstu.ru Skeeba V. Yu. ¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru Plotnikova N. V. ¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: plotnikova1975@mail.ru Lobanov D. V. ², D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: mf_nauka@brstu.ru

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation ² Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

Abstract

Purpose: In order to ensure the required level of wear resistance of high-chromium cast iron powder plasma coatings, research on the effect of high-energy heating by high frequency currents (HEH HFC) on the quality of the surface layer is conducted. **Methods:** The results of metallographic, X-ray diffraction and energy-dispersive studies of the structure of wear-resistant plasma coatings before and after the induction heating are presented. **Results and Discussion:** Pores, unmelted powder particles and discontinuities in the transitional boundary, as well as improved uniformity of the microhardness in the depth the layer have virtually disappeared after additional high-temperature influence. After plasma spraying the value of the microhardness confidence interval was 1.7 ... 2.8 GPa; after HEH HFC - microhardness confidence interval ranged between 0.5 and 1.3 GPa. In the structure of plasma coatings carbide component is preserved in the selected area of induction heating modes. An efficient mode of HFC reheating (source specific power q = $(3, 0 \dots 3, 2) \cdot 108$ W/m2, the relative rate of details movement V = 60 ... 80 mm/s) at which there is a decrease in porosity of the plasma coating from 12 % to 1% is set.

Keywords:

quality, wear resistance, high-chromium cast iron, plasma coatings, structure, high-energy influence, high-frequency currents.

References

1. Cartier M. Handbook of surface treatments and coatings. New York, ASME Press, 2003. 464 p. ISBN: 978-1-86058-375-9.

2. Davis J.R. ed. Handbook of thermal spray technology. ASM International, Materials Park, 2004. 338 p. ISBN-10: 0-87170-795-0. ISBN-13: 978-0-87170-795-6.

3. Tucker R.C. Jr., ed. ASM Handbook, Volume 5A: Thermal Spray Technology. ASM International, Materials Park, 2013. 412 p. ISBN: 978-1-61503-996-8.

4. Puzryakov A.F. *Teoreticheskie osnovy tekhnologii plazmennogo napyleniya* [Theoretical Foundations of Technology Plasma Spraying]. Moscow, BMSTU Publ., 2008. 360 p.

5. Borisov Yu.S., Kharlamov Yu.A., Sidorenko S.L., Ardatovskaya E.N. *Gazotermicheskie pokrytiya iz poroshkovykh materialov: spravochnik* [Thermal spray coating of powder materials. Handbook]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987. 544 p. 6. Chesov Yu.S., Zverev E.A., Plokhov A.V. Struktura plazmennykh iznosostoikikh pokrytii iz poroshkovogo materiala marki PG-S27 [Structure of plasma wear-resistant coatings of powdered ΠΓ-C27]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) - Metal Working and Material Science*, 2010, no. 1 (46), pp. 14–18.

7. Nielsen S.E. Laser fusing-a technique for surface improvement. *Industrial Laser Solutions*, 2009, vol. 24, iss. 12, p. 13.

8. Mathew R., Stoddart P., Nolan D., Durandet Y. Thermal modification of zinc-aluminum coated steel using lasers. Proceedings of the 30th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO 2011), Orlando, Florida, United States, 2011, pp. 457–462.

9. Chesov Yu.S., Tregubchak P.V., Zverev E.A., Erokhin I.A. [Methods to improve the performance properties of plasma coatings]. *Materialy 10-i Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Problemy povysheniya effek-tivnosti metalloobrabotki v promyshlennosti na sovremennom etape"* [Proceedings of the 10th All-Russian Scientific and Practical Conference "Problems of increasing efficiency in the metalworking industry at the present stage"]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2012, pp. 23–25.

10. Fauchais P.L., Heberlein J. V.R., Boulos M.I. Thermal Spray Fundamentals. New York, Springer US Publ., 2014. 1566 p. doi: 10.1007/978-0-387-68991-3. Print ISBN 978-0-387-28319-7.

11. Jianbin Luo, Yonggang Meng, Tianmin Shao, Qian Zhao Advanced Tribology: Proceedings of CIST2008 & ITS-IFToMM2008. Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. 1056 p.

12. Ivantsivskii V.V., Skeeba V.Yu., Stepanova N.P. Metodika naznacheniya ratsional'nykh rezhimov poverkhnostnoi zakalki stalei s ispol'zovaniem kontsentrirovannykh istochnikov nagreva [Definition technique of rational modes of surface hardening of steels with concentrated heat sources]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) - Metal Working and Material Science*, 2006, no. 4 (33), pp. 17–19.

13. Skeeba V.Yu., Pushnin V.N., Erokhin I.A., Kornev D.Yu. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya materiala pri vysokoenergeticheskom nagreve tokami vysokoi chastity [Analysis of the stress-strain state of the material under high-energy heating by high frequency currents]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) - Metal Working and Material Science*, 2014, no. 3 (64), pp. 90–102.

14. Veselov V.S., Chesov Yu.S., Zverev E.A., Tregubchak P.V., Bazarkina V.V., Lozhkin V.S. Osobennosti mikrostruktury iznosostoikikh pokrytii [Features of a microstructure of wear-resistant plasma coatings]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) - Metal Working and Material Science*, 2010, no. 4 (49), pp. 35–37.

15. Chesov Yu.S., Zverev E.A. Issledovanie iznosostoikosti pokrytii, nanesennykh metodom plazmennogo napyleniya [Research of wear resistance of the coatings received by the method of plasma spraying]. *Nauchnyi vestnik NGTU* - *Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2008, no. 3 (32), pp. 175–181.

16. Chesov Yu.S., Zverev E.A. Metodika naneseniya plazmennykh iznosostoikikh pokrytii [Technique of wearresistant plasma coating spraying]. *Nauchnyi vestnik NGTU - Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2014, no. 2 (55), pp. 156–165.

17. Skeeba V.Yu. *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa obrabotki detalei mashin pri integratsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of the technological processing machinery parts with the integration of abrasive grinding and surface hardening currents by high frequency currents. Dr. tech. sci. diss.]. Novosibirsk, 2008. 257 p.

18. Tushinskii L.I., Plokhov A.V., Tokarev A.O., Sindeev V.I. *Metody issledovanii materialov: Struktura, svoist-va i protsessy naneseniya neorganicheskikh pokrytii* [Techniques of materials research: The structure, properties and deposition processes of inorganic coatings]. Moscow, Mir Publ., 2004. 384 p. ISBN 5-03-003572

19. Vander Voort G.F., ed. ASM Handbook. Vol. 9: Metallography and Microstructures. ASM International Publ., 2004. 1184 p. ISBN: 978-0-87170-706-2

20. Garber M.E. *Iznosostoikie belye chuguny* [Wear-resistant white iron]. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 281 p.

21. Bunin K.P., Malinochka Ya.N., Taran Yu.N. *Osnovy metallografii chuguna* [Fundamentals of cast iron metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969. 420 p.

Funding

The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Public contract no. 2014/138, project no. 257).

Received 22 September 2014 Revised 06 October 2014 Accepted 05 November 2014