УДК 621-033.6

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ НАПЛАВКИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЗАКАЛКИ*

А.А. ЛОСИНСКАЯ, аспирант
Е.А. ДРОБЯЗ, канд. техн. наук, доцент
В.А. БАТАЕВ, доктор техн. наук, профессор
Н.В. ПЛОТНИКОВА, канд. техн. наук, доцент
(*НГТУ, г. Новосибирск*)
М.Г. ГОЛКОВСКИЙ, канд. ф-м. наук, с.н.с.
(*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск*)

Поступила 5 октября 2013
Рецензирование 5 ноября 2013
Принята к печати 10 ноября 2013

Дробяз Е.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: ekaterina.drobyaz@ya.ru

Рассмотрены особенности формирования структуры в поверхностных слоях низкоуглеродистой стали 20 после вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковой железографитовой смеси и последующей электронно-лучевой закалки. Показано, что в процессе наплавки формируются покрытия толщиной до 2,6 мм, твердость которых достигает 5300 МПа. Последующая электронно-лучевая закалка обеспечивает повышение микротвердости до 7000… 8000 МПа. Повышение твердости, обусловленное формированием в процессе электронно-лучевой закалки высокопрочной мелкодисперсной мартенситной структуры, благоприятно отражается на триботехнических свойствах материалов. Наибольшими показателями износостойкости обладают сформированные покрытия со структурой заэвтектоидной стали после дополнительной термической обработки.

Ключевые слова: высокоскоростной нагрев, цементация, покрытие, карбиды, износостойкость.

Введение

Одним из наиболее распространенных и экономичных процессов поверхностного упрочнения сталей является цементация, заключающаяся в насыщении поверхностных слоев изделий углеродом в сочетании с последующей термической обработкой (закалка и низкий отпуск). Механизм упрочнения сталей при реализации такого процесса основан на формировании в поверхностных слоях изделий высокоуглеродистого мартенсита, обладающего повышенной твердостью. В слое, расположенном ближе к поверхности изделия, при цементации формируется структура заэвтектоидного типа (перлит и вторичный цементит). После закалки и низкого отпуска в пределах этого слоя образуется отпущенный мартенсит с включениями цементита глобулярного типа. Такая структура способствует повышению износостойкости материала в различных условиях изнашивания [1]. При этом

* Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации. Договор № 16.120.11.6112-МК.

сердцевина стальных изделий обладает повышенным уровнем вязкости.

Обладая рядом важных достоинств, технология цементации имеет также и недостатки. Один из них заключается в малой производительности и высокой энергоемкости процесса. При формировании упрочненных слоев толщиной ~ 0,5...2 мм длительность процесса цементации составляет 6...8 часов и более. Второй недостаток обусловлен тем, что технологические возможности методов цементации ограничены габаритами термического оборудования. Создание и эксплуатация оборудования для цементации особо крупных изделий экономически не рациональны. Эффективным решением отмеченной проблемы, позволяющим, как и при цементации, получать слои достаточной толщины, является наплавка на изделия упрочняющих покрытий. В настоящее время в производственных условиях применяется множество методов, дающих возможность наплавлять материалы, обладающие высокой износостойкостью. В первую очередь, речь идет о процессах лазерной [2–4], электронно-лучевой, плазменной, электродуговой наплавки [5–9]. Особо может быть выделена технология поверхностного упрочнения сталей пучками электронов, выведенными в воздушную атмосферу. Эта технология, реализуемая на мощных промышленных ускорителях производства Института ядерной физики им. Г.И. Будкера (г. Новосибирск), позволяет с высокой производительностью наплавлять на стальные изделия износостойкие покрытия, а также при необходимости проводить поверхностную термическую обработку сталей [10, 11].

Цель данной работы заключалась в изучении возможности использования ускорителя электронов для реализации комбинированной обработки низкоуглеродистой стали, сочетающей наплавку порошковой железо-графитовой смеси с последующей закалкой наплавленного слоя.

Методика экспериментальных исследований

В качестве материала, выполнявшего функцию подложки, использовали нормализованную низкоуглеродистую стать 20 (0,19 % C; 0,47 % Mn; 0,20 % Si; 0,009 % P; 0,042 % S; 0,15 % Ni; 0,15 % Cu) с ферритоперлитной структурой. Образцы для наплавки имели форму пластин с размерами 100×50×10 мм. Для наплавки использовали порошковую смесь, содержащую 25 % (вес.) карбонильного железа ОСЧ6-2, 25 % (вес.) графита марки ГЛ-1 (ГОСТ 5279-74) и 50 % (вес.) флюса MgF_2. Перед наплавкой порошковую смесь ровным слоем насыпали на поверхность пластины в количестве 0,2 г/см^2.

Наплавку выполняли на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-6 в Институте ядерной физики СО РАН по следующим режимам: ток пучка (I) – 24 и 26 мА, диаметр пучка (d) – 12 мм, скорость перемещения электронного пучка (v) – 10 мм/с, расстояние от выпускного окна до обрабатываемой поверхности (h) – 90 мм. Для того чтобы обеспечить наплавку порошковой смеси по всей ширине образца, осуществлялось сканирование электронного пучка с частотой 50 Гц и размахом 50 мм.

Закалку и отпуск осуществляли также с использованием электронного пучка, выведенного в атмосферу. Основные технологические параметры электронно-лучевой закалки: энергия пучка – 1,4 МэВ; ток пучка – 32 и 34 мА; расстояние от выпускного отверстия до обрабатываемой поверхности – 90 мм; скорость перемещения заготовки в продольном направлении – 70 мм/с; частота сканирования – 50 Гц; размах сканирования – 50 мм. В режиме отпуска закаленных слоев ток пучка составлял 9,5 мА, расстояние от выпускного отверстия до заготовки – 122 мм, скорость перемещения заготовки – 70 мм/с.

Структурные исследования сталей выполняли с использованием светового микроскопа Axio Observer A1m и растрового микроскопа EVO 50 XVP компании «Carl Zeiss». Объектами исследования служили металлографические шлифы, приготовленные по стандартным методикам, включающим операции механического шлифования и полирования. Для оценки твердости материалов использовали прибор Wolpert Group 402MVD. Нагрузка на алмазный индентор составляла 0,98 Н.

Износостойкость при трении о закрепленные частицы абразива оценивали на образцах, имеющих форму цилиндров диаметром 2 мм и высотой 10 мм. В процессе испытаний образцы с силой 3 Н прижимались к вращающемуся диску с абразивной бумагой и перемещались при этом в радиальном направлении. Траектория движения

образцов относительно абразивной бумаги имела форму спирали Архимеда. Дорожки соседних проходов не пересекались. В качестве абразивного материала применялся карбид кремния с размерами частиц от 80 до 100 мкм. Длительность испытаний составляла 35 с. В ходе испытаний оценивалась потеря массы образцов.

Результаты и обсуждение

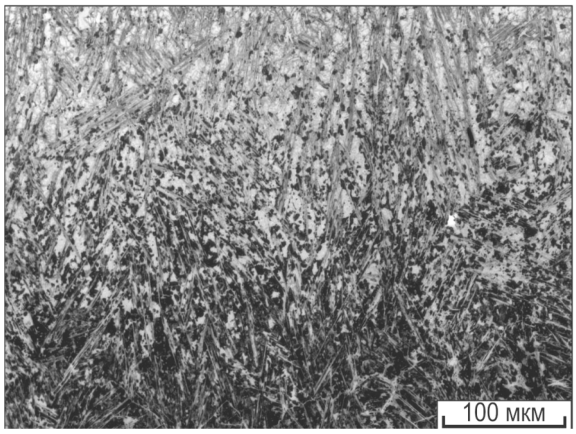
Металлографические исследования показали, что в процессе наплавки порошковой железографитовой смеси формируются покрытия толщиной 1,8 и 2,6 мм с содержанием углерода 2,19 и 1,57 % соответственно. Таким образом, при наплавке с током пучка 24 мА на заготовке был сформирован слой доэвтектического чугуна, а при 26 мА – заэвтектоидной стали.

Несмотря на простой химический состав исследуемых материалов в результате последующей электронно-лучевой закалки формируется сложная структура, состоящая из пяти зон, различающихся по содержанию углерода и структурных составляющих. В поверхностном слое толщиной 380...400 мкм образуется высокоуглеродистый мартенсит (рис. 1, *а*). Лишь в некоторых микрообъемах наблюдаются остатки цементитных кристаллов. Их присутствие обусловлено малым временем пребывания материала в высокотемпературном состоянии. Кроме того, в поверхностном слое присутствует остаточный аустенит, образование которого связано с повышенным содержанием углерода и высокотемпературным нагревом материала.

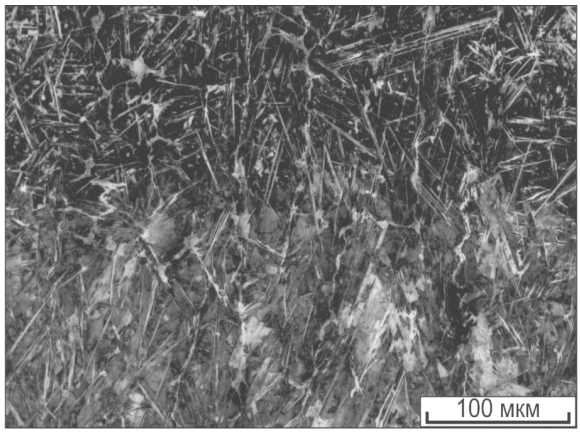
Вторая зона, глубина которой составляет ~ 200 мкм, характеризуется наличием протяженных кристаллов цементита видманштеттова типа и мартенсита. Формирование такой структуры свидетельствует о том, что в процессе электронно-лучевой закалки материал анализируемой зоны был нагрет в соответствии с диаграммой состояния «железо-углерод» до температуры, соответствующей двухфазной аустенитно-цементитной области. Отличительной чертой этой зоны является наличие большого количества остаточного аустенита.

В третьей зоне, глубина которой составляет ~ 300 мкм, наблюдаются кристаллы мартенсита, остаточного аустенита, перлита и видманштеттова цементита (рис. 1, *б*). По мере снижения температуры нагрева материала объемная доля мартенсита и остаточного аустенита уменьшается, а перлита и видманштеттова цементита возрастает. Четвертая зона характеризуется наличием перлита и цементита видманштеттова типа. Кристаллы цементита представляют собой протяженные пластины со слоистым строением. Длина цементитных пластин достигает 250 мкм, ширина 5 мкм. Пятая зона соответствует исходной стали с феррито-перлитной структурой.

Структурная особенность поверхностного слоя, полученного путем электронно-лучевой закалки предварительно наплавленного чугуна,



а



б

Рис. 1. Структура поверхностного слоя, сформированного при вневакуумной электронно-лучевой наплавке и последующей электронно-лучевой закалке наплавленного слоя

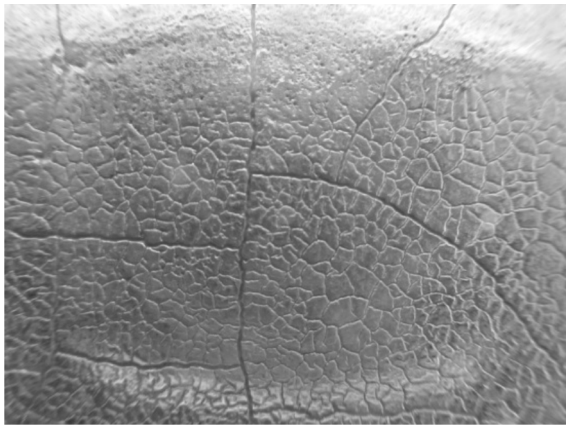


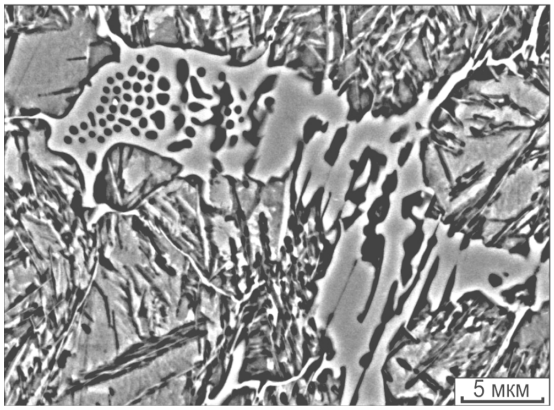
Рис. 2. Поверхность слоя, полученного путем электронно-лучевой закалки предварительно наплавленного чугуна

заключается в возникновении в материале сетки трещин, различимых невооруженным взглядом (рис. 2). Размер ячеек этой сетки составляет ~ 3...5 мм. Образование сетки трещин свидетельствует о формировании в процессе высокоскоростной закалки чугуна напряжений высокого уровня.

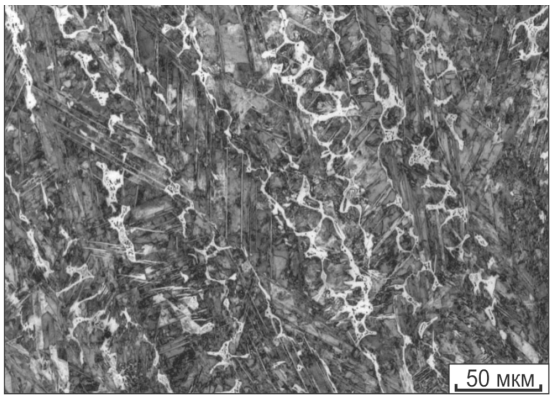
Принципиальное отличие анализируемого материала от структуры, полученной при закалке заэвтектоидной стали, заключается в наличии во всех зонах, за исключением зоны с исходной структурой стали, участков ледебурита (рис. 3). В структуре переходной зоны кроме ледебурита зафиксированы микрообъемы перлита, мелкокристаллического мартенсита, остаточного аустенита и пластины видманштеттова цементита.

Анализ измерений микротвердости сформированных покрытий из заэвтектоидной стали в результате электронно-лучевой закалки показал увеличение твердости до 7000 МПа. Твердость закаленного чугуна составила 8000 МПа. На глубине 900 мкм твердость обоих материалов одинаковая – 6000 МПа. Повышение твердости, обусловленное наплавкой высокоуглеродистых слоев и их последующей закалкой, благоприятно отразилось на триботехнических свойствах материалов.

Результаты испытаний материалов в условиях воздействия закрепленных частиц абразива представлены на рис. 4. В качестве эталона для оценки поведения материалов при изнашивании была выбрана низкоуглеродистая сталь после цементации в твердом карбюризаторе, закалки и отпуска при 200 °С. Уровень ее относительной



а



б

Рис. 3. Структура поверхностного слоя стальной заготовки после электронно-лучевой наплавки слоя доэвтектического чугуна (2,19 % С) и последующей закалки электронным пучком, выведенным в атмосферу

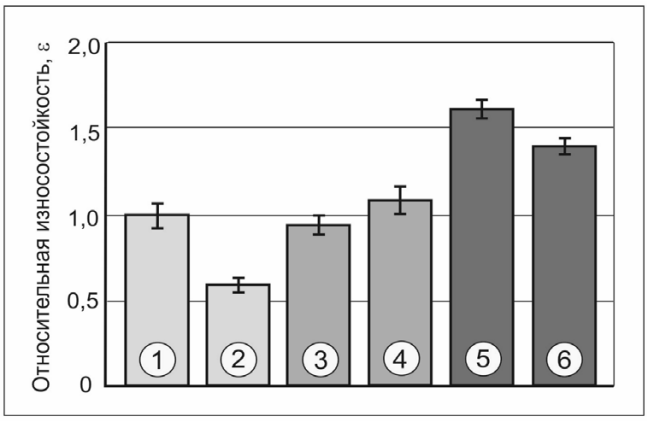


Рис. 4. Относительная износостойкость материалов в условиях воздействия закрепленных частиц абразива:

1 – сталь после цементации в твердом карбюризаторе, закалки отпуска при 200 °С; *2* – нормализованная низкоуглеродистая сталь; *3* – наплавленная сталь (I = 26 мА); *4* – наплавленный чугун (I = 24 мА); *5* – наплавленная сталь (I = 26 мА) после закалки и отпуска; *6* – наплавленный чугун (I = 24 мА) после закалки и отпуска

износостойкости ε был принят за единицу. Наименьшей износостойкостью из исследованных в работе материалов обладает нормализованная сталь 20 (ε = 0,57). Относительная износостойкость наплавленных слоев заэвтектоидной стали и доэвтектического чугуна, не подвергнутых дополнительной термической обработке, составляет соответственно 0,95 и 1,07. Лучшим показателем износостойкости (ε = 1,6) обладает наплавленная электронным лучом заэвтектоидная сталь после дополнительной термической обработки. Износостойкость чугунного покрытия несколько ниже (ε = 1,4), что, вероятно, связано с образованием в результате закалки сплошной сетки трещин.

Выводы

Мощный электронный пучок, выведенный в атмосферу, позволяет с высокой скоростью выполнять наплавку на стальные заготовки порошковой железографитовой смеси, формировать на них поверхностные слои глубиной до 2,6 мм с повышенным содержанием углерода, а также осуществлять закалку на глубину до 1 мм с последующим отпуском на одном и том же технологическом оборудовании.

При использовании выбранных в работе режимов процессы наплавки, закалки и отпуска высокоуглеродистых слоев выполняются с высокой производительностью, в десятки раз большей, чем при осуществлении традиционной химико-термической обработки.

Микротвердость поверхностно закаленных слоев стали и чугуна достигает 7000 и 8000 МПа. Электронно-лучевая закалка поверхностных слоев со структурой доэвтектического чугуна сопровождается формированием сетки трещин. При закалке стального слоя, содержащего 1,57 % С, образования трещин не зафиксировано. В условиях воздействия закрепленных частиц абразива интенсивность изнашивания наплавленных и закаленных электронным пучком поверхностных слоев заэвтектоидной стали и доэвтектического чугуна ниже, чем низкоуглеродистой стали, цементованной в твердом карбюризаторе с последующей закалкой и низким отпуском. Комплекс высоких триботехнических свойств после проведения операций электронно-лучевой закалки и отпуска обусловлен структурными особенностями полученных покрытий, в частности, мелкозернистой структурой с выделениями высокоуглеродистого мартенсита.

Технология может быть рекомендована для упрочнения локальных зон крупных изделий, габариты которых не позволяют обрабатывать их с использованием промышленных нагревательных печей. Наплавленные слои высокоуглеродистой стали целесообразно подвергать последующей электронно-лучевой закалке и отпуску. С целью предотвращения образования сетки трещин слои белого чугуна, наплавленные электронным пучком, целесообразно использовать без дополнительной закалки.

Список литературы

1. *Новиков И.И.* Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.

2. *Das D. K.* Prior Austenite Grains in Steels laser Surface Alloyed with Carbon // Materials characterization. – 1997. – V. 38, No 3. – P. 135–141.

3. *Abboud J.H., Benyounis K.Y., Olabi A.G., Hashmi M.S.J.* Laser surface treatments of iron-based substrates for automotive application // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – V. 182, No 1. – P. 427–431.

4. *Khalfallah I.Y., Rahoma M.N., Abboud J.H., Benyounis K.Y.* Microstructure and corrosion behavior of austenitic stainless steel treated with laser // Optics&Laser Technology. – 2011. – V. 43. – P. 806–813.

5. *Fadeev S.N., Golkovsky 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. – Vol. 57, No 3-6. – P. 653–655.

6. *Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovsky M.G., Teplykh A.Yu., Burov V.G., Veselov S.V.* Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel // Surface and Coatings Technology. – 2012. – No 207. – P. 245–253.

7. *Teplykh A., Golkovsky M., Bataev A., Drobyaz E., Veselov S., Golovin E., Bataev I., Nikulina A.* Boride Coatings Structure and Properties, Produced by Atmospheric Electron-Beam Cladding // Advanced Materials Research. – 2011. – Vols. 287–290. – P. 26–31.

8. *Nikolaou J., Bourithis L., Papadimitriou G.* Selective case hardening of plain steel by carbon alloying with a plasma transferred arc (PTA) technique // Journal of materials science.- 2003.- V. 38. – No 13. – P. 2883–2891.

9. *Eroglu M., Ozdemir N.* Tungsten-inert gas surface alloying of a low carbon steel // Surface and Coatings Technology. – 2002. – No 154. – P. 209–217.

10. *Батаева Е. А., Батаев И. А., Буров В. Г., Тушинский Л. И., Голковский М. Г.* Влияние исходного состояния на неоднородность структуры углеродистых сталей, упрочненных методом электронно-лучевой обработки при атмосферном давлении // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2009. – № 3. – С. 3–1.

11. *Батаев В.А., Батаев А.А., Голковский М.Г., Остроменский П.И., Коротаев Б.В.* Упрочнение боковых граней головок железнодорожных рельсов электронно-лучевой обработкой в воздушной среде // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2002. – № 12. – С. 14–18.

Obrabotka metallov

N 4(61), October–December 2013, Pages 5-11

Structure and properties of the low carbon steel surface layers, obtained by cladding of carbon-containing powder mixtures, followed by quenching

[1]A.A. Losinskaya, [1]E.A. Drobyaz, [1]V.A. Bataev, [1]N.V. Plotnikova, [2]M.G. Golkovsky

[1]Novosibirsk State Technical University, Prospect K. Marksa, 20
Novosibirsk, 630073, Russia
[2]Institute of Nuclear Physics, Prospect akademika Lavrentieva, 11,
Novosibirsk, 630090, Russia

E-mail: ekaterina.drobyaz@ya.ru

Received 5 October 2013
Revised 5 November 2013
Accepted 10 November 2013

Abstract

The features of the structure formation in the surface layers of low carbon steel 20 after nonvacuum electron-beam deposition of iron- graphite powder mixture and subsequent electron-beam hardening are considered. It is shown that the thickness of the coating, formed during deposition, is 2.6 mm and its hardness reaches 5300 MPa. The subsequent electron-beam hardening enhances the microhardness up to 7000 ... 8000 MPa. Increase in hardness due to the formation of the high-strength fine-grained martensitic structure in the process of electron-beam hardening positively affects the tribological properties of materials. Coatings with the structure of a hypereutectoid steel formed after additional heat treatment have the greatest wear index.

Keywords: High heating, carburizing, cover, carbides, wear resistance

References

1. Novikov I. I. *Teorija termicheskoj obrabotki metallov* [The theory of heat treatment of metals]. Moscow, Metallurgija, 1986. 480 p.

2. Das D. K. Prior Austenite Grains in Steels laser Surface Alloyed with Carbon. Materials characterization. 1997, Vol. 38, no. 3, pp. 135-141.

3. Abboud J.H., Benyounis K.Y., Olabi A.G., Hashmi M.S.J. Laser surface treatments of iron-based substrates for automotive application. Journal of Materials Processing Technology. 2007, Vol. 182, no. 1, pp. 427–431.

4. Khalfallah I.Y., Rahoma M.N., Abboud J.H., Benyounis K.Y. Microstructure and corrosion behavior of austenitic stainless steel treated with laser. Optics&Laser Technology. 2011, Vol. 43, pp. 806–813.

5. Fadeev S.N., Golkovsky 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, Vol. 57, no. 3-6, pp. 653-655.

6. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovsky M.G., Teplykh A.Yu., Burov V.G., Veselov S.V. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel. Surface and Coatings Technology. 2012, no. 207, pp. 245–253.

7. Teplykh A., Golkovsky M., Bataev A., Drobyaz E., Veselov S., Golovin E., Bataev I., Nikulina A. Boride Coatings Structure and Properties, Produced by Atmospheric Electron-Beam Cladding. Advanced Materials Research. 2011, Vol. 287-290, pp. 26-31.

8. Nikolaou J., Bourithis L., Papadimitriou G. Selective case hardening of plain steel by carbon alloying with a plasma transferred arc (PTA) technique. Journal of materials science. 2003, Vol. 38, no. 13, pp. 2883 – 2891.

9. Eroglu M., Ozdemir N. Tungsten-inert gas surface alloying of a low carbon steel. Surface and Coatings Technology. 2002, no. 154, pp. 209–217.

10. Bataeva E.A., Bataev I.A., Burov V.G., Tushinskii L.I., Golkovskii M.G. Vlijanie ishodnogo sostojanija na neodnorodnost' struktury uglerodistyh stalej, uprochnennyh metodom jelektronno-luchevoj obrabotki pri atmosfernom davlenii [Effect of initial state on inhomogeneity of the structure of carbon steels hardened by electron-beam treatment at atmospheric pressure]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*, 2009, no. 3, pp. 3-1.

11. Bataev V.A., Bataev A.A., Golkovskii M.G., Ostromenskii P.I., Korotaev B.V. Uprochnenie bokovyh granej golovok zheleznodorozhnyh rel'sov jelektronno-luchevoj obrabotkoj v vozdushnoj srede [Hardening of Side Faces of Railheads by Electric Beam Treatment in Air]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*, 2002, no. 12, pp. 14-18.