

УДК 621,7: 672

ВЫБОР ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЙ НАГРЕВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА БОРИРОВАНИЯ И ОБЪЕМНОЙ ЗАКАЛКИ КРУПНЫХ ШТАМПОВ ИЗ СТАЛИ 5ХНМ

Минков К.А.¹, ведущий инженер (k.minkov@ruspolymet.ru)

*Минков А.Н.², к.т.н., доцент кафедры «Металловедение и термическая
обработка металлов» (minkov46@mail.ru)*

*Хлыбов А.А.³, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение, технологии
материалов и термическая обработка металлов» (hlybov_52@mail.ru)*

¹ ПАО «Русполимет»

(607010, Россия, Нижегородская обл., Кулебаки, ул. Восстания, 1)

² Донбасская государственная машиностроительная академия
(84313, Украина, Донецкая обл., Краматорск, ул. Академичная, 72)

³ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
(603022, Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, 24)

Аннотация. В промышленности широкое распространение получили штампы для горячего деформирования. В процессе эксплуатации они подвергаются воздействию высоких температур, напряжений, близких к пределу текучести, переменных термических нагрузок. Для производства штампов используются инструментальные стали повышенной прокаливаемости с высокими механическими характеристиками. В данной работе рассматривается возможность применения стали 5ХНМ. Одной из технологических операций при изготовлении штампов является закалка в масле. Для улучшения эксплуатационных характеристик, в том числе для повышения износостойкости штампов, рационально применять объемное и поверхностное упрочнение, в частности химико-термическую обработку. Представлен способ поверхностного упрочнения путем совмещенного нагрева под химико-термическую и термическую обработку. В качестве поверхностного способа упрочнения крупногабаритных штампов горячего деформирования предложено использовать борирование. Выбраны и подтверждены оптимальные температурно-временные параметры нагрева под совмещенную термическую обработку. Предложенный режим химико-термической обработки позволяет получить необходимую толщину борированного слоя, обеспечивающего высокую твердость и коррозионную стойкость в рабочем диапазоне температур штампа. Проведены исследования влияния термической обработки на структуру и размер зерна в образцах. Показано, что с повышением температуры и времени выдержки размер зерна увеличивается. Это приводит к снижению пределов прочности, текучести, твердости, ударной вязкости, что может отрицательно влиять на эксплуатационные свойства штампов. Для определения механических характеристик проведены испытания образцов (в исследуемом диапазоне температур и выдержек) на растяжение и ударную вязкость. Все испытания проводились в соответствии с существующими ГОСТами. На основании этих результатов выбраны температура и время борирования, обеспечивающие высокие механические свойства и толщину борированного слоя. Предложенный подход позволил значительно сократить экономические затраты на изготовление штампов из стали 5ХНМ за счет исключения из технологического процесса повторного нагрева для проведения закалки при сохранении требуемых эксплуатационных характеристик крупногабаритных штампов.

Ключевые слова: борирование, штамп, объемная закалка, отпуск, температура, время, сталь.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-9-681-685

В процессе эксплуатации штампы горячего деформирования находятся под воздействием высоких температур нагрева и знакопеременных механических и термических нагрузок, значительного уровня напряжений, близкого к пределу текучести штамповых сталей [1, 2]. Такие жесткие условия эксплуатации приводят к выходу из строя штампов из-за пластической деформации (смятия) или хрупкого разрушения, интенсивного износа рабочей поверхности штампов и образования на ней сетки разгарных трещин [3 – 7].

Учитывая высокую стоимость и трудоемкость изготовления крупных штампов для горячего деформирования, проблема повышения их стойкости является одной из актуальных в современном машиностроении.

Наиболее распространенными марками сталей для изготовления штампов и деталей оснастки традиционно являются стали повышенной прокаливаемости 5ХНМ, 5ХНВ и др. [1, 3, 8]. В работе рассмотрим сталь 5ХНМ. Сочетание удовлетворительной твердости и теплоустойчивости, высокой вязкости и низкой себестоимости данной марки делают ее незаменимой в производстве. Сталь используют для изготовления поковок деталей общего машиностроения, цельнокатаных колец различного назначения, молотовых штампов паровоздушных и пневматических молотов массой падающих частей свыше 3 т, прессовых штампов и штампов машинной скоростной штамповки при горячем деформировании легких цветных сплавов и т. д.

Химический состав и назначение основных марок штамповых сталей регламентированы ГОСТ 5950–2000. Химический состав стали 5ХНМ, %: 0,5 – 0,8 Mn; ≤0,3 Cu; 1,4 – 1,8 Ni; ≤0,03 S; 0,15 – 0,3 Mo; 0,5 – 0,6 C; ≤0,03 P; 0,5 – 0,8 Cr; 0,1 – 0,4 Si.

Большое разнообразие условий работы штампов предопределяет не только применение различных сталей, но и необходимость получать в каждом конкретном случае оптимальное для данных условий сочетание свойств за счет правильного выбора режимов термической обработки. Технологический процесс термической обработки штампов и деталей оснастки состоит из закалки для образования мартенсита и отпуска с целью получения структуры сорбита или троостита [2, 3, 6, 7].

При этом в зависимости от назначения штампа возможен выбор разных температур нагрева под закалку, закалочных сред и способов охлаждения, а также температур отпуска. Режимы закалки и отпуска не универсальны, их рекомендуется назначать дифференцированно в соответствии с условиями работы инструмента [3, 7].

Объемное упрочнение крупногабаритных штампов предусматривает проведение следующих технологических операций: нагрев до 840 – 860 °С, выдержку, последующее подстуживание на воздухе до 750 °С (5 – 10 мин) и закалку штампа в минеральном масле. После закалки стали подвергают отпуску при температуре 500 – 600 °С. Дополнительный отпуск хвостовика включает нагрев до температуры 680 – 700 °С и последующее охлаждение на воздухе. Штамповые стали при охлаждении в масле закаляются на мартенситные структуры [9 – 11]. При проведении в дальнейшем отпуска получаем структуры троостита или троостосорбита отпуска [3, 11]. Полученные структуры обеспечивают необходимые прочность, вязкость и разгаростойкость.

Для улучшения эксплуатационных характеристик изделия после закалки и отпуска подвергают операции поверхностного упрочнения.

Поверхностное упрочнение для повышения износостойкости может быть достигнуто химико-термической обработкой штампов [5, 6, 12 – 15]. С этой целью их подвергают азотированию, цианированию, борированию и хромированию. Из указанных способов поверхностного упрочнения борирование является наиболее предпочтительным. Этот процесс обеспечивает получение наиболее высокой твердости поверхностных слоев до 18 – 20 ГПа, которая сохраняется до температуры около 700 °С. Кроме этого, борированные слои характеризуются высокой стойкостью к окислению в воздушной среде при температурах 700 – 850 °С. Борирование способствует также повышению коррозионной стойкости сталей [8, 16 – 19].

Наиболее простым способом термодиффузионного насыщения рабочей поверхности бором является борирование в порошковых смесях. Существующие тех-

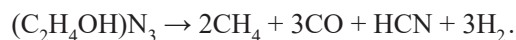
нологии предусматривают проведение борирования при 910 – 930 °С в герметичных контейнерах и последующее охлаждение штампа. В дальнейшем штамп извлекают из контейнера и производят термическую обработку, включающую закалку в масле с температуры 830 – 850 °С и последующий отпуск при 500 – 520 °С.

Необходимость изготовления контейнеров и проведения работ по их герметизации и разгерметизации делает этот процесс сложным и дорогостоящим. Повторный нагрев штампа для проведения закалки также увеличивает стоимость и повышает энергоемкость изготовления штампов.

Целью проведения настоящей работы является получение исходных данных для разработки совмещенного процесса объемного и поверхностного упрочнения, исключающего необходимость применения контейнеров для борирования штампов и проведения повторного нагрева для их закалки.

Для решения поставленной задачи был разработан способ борирования крупных штампов в шахтных печах типа СШЦМ в защитной атмосфере, включающий нагрев и выдержку в печи с защитной атмосферой, создаваемой путем подачи триэтанолamina в печь [20].

Триэтанолamin при нагреве свыше 500 °С разлагается по реакции



Метан и цианистый водород в свою очередь разлагаются по реакциям



В результате указанных реакций образуются активный углерод, водород и азот, что и создает защитную атмосферу.

Проведенные исследования позволили определить оптимальное количество подаваемого в печь триэтанолamina, которое составляет 700 – 800 г/ч на 1 м³ печного пространства. При большем количестве подаваемого триэтанолamina ухудшаются условия диффузионного насыщения поверхности бором и увеличивается его расход. При меньшем количестве защитная атмосфера теряет свои функциональные свойства.

Применение предложенного способа позволяет исключить необходимость использования контейнеров, а закалку штампа проводить непосредственно после борирования, тем самым отпадает необходимость повторного нагрева под закалку. Для достижения поставленной цели необходимо получить и обосновать оптимальные температурно-временные условия нагрева. При этом температура нагрева и длительность выдержки должны обеспечить получение:

– необходимой толщины борированного слоя (0,10 – 0,12 мм), обеспечивающего повышение эксплуатационной стойкости штампа;

– высоких прочностных и пластических свойств и ударной вязкости основного металла, позволяющих противостоять значительным динамическим нагрузкам в процессе штамповки в сочетании с высокой твердостью, исключающей продавливание борированного слоя.

Для исследования зависимости толщины борированного слоя от условий нагрева проводили борирование образцов в порошковой смеси на основе карбида бора с добавлением 0,5 – 1,0 % NH_4Cl в качестве активатора. Толщину борированного слоя определяли на приборе для измерения микротвердости ПМТ-3.

Характеристики режимов для исследования влияния температурно-временных условий нагрева на толщину борированного слоя приведены в табл. 1. В качестве исходного режима принят существующий технологический процесс термической обработки штампов, включающий нагрев до температуры 840 – 860 °С и выдержку 2 ч (режим 1). В результате борирования при таких температурно-временных условиях толщина борированного слоя составляет 0,03 мм и является недостаточной для обеспечения высокой эксплуатационной стойкости. Борированный слой необходимой толщины 0,12 мм формируется лишь при выдержке длительностью 16 ч (режим 3). С повышением температуры до 890 °С процесс насыщения бором интенсифицируется и уже при выдержке длительностью 6 ч распространение сплошного слоя боридов происходит на глубину 0,12 мм (режим 8). При температуре 930 °С слой толщиной 0,12 мм образуется после насыщения бором в течение 4 ч (режим 8).

На взгляд авторов, самым экономичным и технологичным является процесс борирования, осуществляемый по режиму 5 ($t = 890$ °С, $\tau = 6$ ч). Однако повышение температуры и длительности выдержки по сравнению с действующей технологией могут привести к росту аустенитного зерна, и, как следствие, к снижению механических свойств основного металла штампового кубика. Поэтому проведено исследование влияния

температуры и длительности выдержки на величину зерна аустенита и механические свойства стали 5ХНМ. Для этого на заготовках размером 120×20×20 мм проводили термическую обработку в соответствии с режимами, указанными в табл. 1. Заготовки после нагрева и выдержки охлаждали в масле. После термической обработки из них изготавливали образцы для проведения испытаний на растяжение (тип III, ГОСТ 1497-84) и ударную вязкость (тип I, ГОСТ 9454-78).

Зерно аустенита выявляли химическим путем после специальной термической обработки шлифов, обеспечивающей декорирующее выделение карбидов по границам зерен. Травление образцов осуществляли в 4 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты. Для определения величины зерна производили подсчет зерен в трех характерных полях и определяли средние значения площади, диаметра и размера зерна аустенита.

В табл. 1 также представлены результаты измерения балла аустенитного зерна. Установлено, что с повышением температуры от 850 до 930 °С и длительности нагрева от 2 до 6 ч размер аустенитного зерна увеличивается от 0,020 мм (балл 8, режим 1) до 0,088 мм (балл 4, режим 9). Однако при температуре 890 °С и длительности выдержки 6 ч (режим 5) размер зерна аустенита практически не изменяется по сравнению с действующим технологическим процессом (режим 1) и составляет 0,028 мм (балл 7).

Результаты испытаний механических свойств образцов, термообработанных по различным режимам, представлены в табл. 2. Твердость измеряли на остатках ударных образцов после испытаний.

Установлено, что при повышении температуры нагрева до 930 °С наблюдается рост аустенитного зерна, что приводит к снижению ударной вязкости (от 40 до 25 Дж/см²) по сравнению с существующей технологией закалки (режим 1). Наблюдается также снижение

Таблица 1

Влияние температурно-временных условий борирования на глубину борированного слоя и балл аустенитного зерна

Table 1. Influence of temperature-time conditions of borating on the depth of borated layer and austenitic grain grade

Номер режима	Температура нагрева, °С	Длительность выдержки, ч	Толщина борированного слоя, мм	Балл аустенитного зерна
1	850	2	0,03	8
2	850	6	0,06	7 – 8
3	850	14	0,12	7
4	890	2	0,06	7 – 8
5	890	6	0,12	7
6	890	10	0,16	5 – 6
7	930	2	0,08	6
8	930	4	0,12	5 – 6
9	930	6	0,14	4 – 5

Влияние температуры закалки и величины аустенитного зерна на механические свойства стали 5ХНМ

Table 2. Influence of quenching temperature and austenitic grain size on hardness and mechanical properties

Номер режима	Механические свойства стали 5ХНМ						Балл аустенитного зерна
	σ_b , МПа	σ_t , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	HRC	
1	1400	1180	7	14	42	41	8
2	1430	1210	8	21	42	41	7 – 8
3	1450	1240	6	17	39	40	7
4	1400	1230	7	18	39	40	7 – 8
5	1370	1220	8	17	38	40	7
6	1200	1000	7	16	34	37	5 – 6
7	1300	1100	7	14	32	34	6
8	1200	980	6	12	28	33	5 – 6
9	1100	950	5	11	25	32	4 – 5

твердости (от 42 до 32 HRC). Тем не менее, при закалке с температуры нагрева 890 °С и выдержке 6 ч (режим 5) сталь еще обладает достаточно высоким комплексом механических свойств и твердости.

Выводы. Полученные данные свидетельствуют о возможности осуществления совмещения процесса борирования ($t = 890$ °С, $\tau = 6$ ч) и последующей закалки при производстве крупных штампов из стали 5ХНМ. При этом сохраняется высокий комплекс механических свойств основного металла штампа и создаются условия для получения борированных слоев достаточной толщины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Околович Г. А. Штамповые стали для холодного деформирования металлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. – 202 с.
- Лахтин Ю.М. Материаловедение: Учебник. – М.: Металлургия, 1990. – 528 с.
- Геллер Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1975. – 584 с.
- Mintz B. The influence of composition on the hot ductility of steel and to the problem of transverse cracking // *ISIJ International*. 1999. Vol. 39. No. 9. P. 833 – 855.
- Fleischer R.L., Hibberd W.R. The relation between the structure and mechanical properties of metals. – Н.М.С.О., 1963. – 203 p.
- Тополянский П.А., Тополянский А.П., Ермаков С.А., Соенин Н.А. Повышение стойкости инструмента для холодной объемной штамповки // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2014. № 3. С. 22 – 32.
- Гадалов В.Н., Емельянов С.Г., Романенко Д.Н., Розина Т.Н. Износ и повышение стойкости штампов // *Новые решения в области упрочняющих технологий*. Т.1. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016. С. 46 – 48.
- Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Власова О.А. Совершенствование технологии химико-термической обработки инструментальных сталей // *Обработка металлов*. 2009. № 1. С. 14 – 15.

- Богданова Т.А., Перебоева А.А., Третьякова Л.П., Окладникова Н.В. Исследование структуры и свойств штамповых инструментальных сталей // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева*. 2009. № 2. С. 239 – 241.
- Попова Л.Е., Попов А.А. Диаграммы превращения аустенита в сталях и β -раствора в сплавах титана: Справочник термиста. – М.: Металлургия, 1991. – 503 с.
- Sourmail T., Smanio V. Low temperature kinetics zabainite formation in high carbon steels // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. No. 7. P. 2639 – 2648.
- Yang B., Degischer H.P., Presslinger H. etc. Influence of chemical composition on high temperature tensile properties of carbon steels // *BHM Berg- und Huttenmannische Monatshefte*. 2005. Vol. 150. No. 9. P. 313 – 320.
- Thermochemical Surface Engineering of Steels / Mittemeijer Eric J., Somers Marcel A.J. eds. Woodhead Publishing, 2015. – 827 p.
- Czerwinski Frank. Thermochemical Treatment of Metals. – INTECH Open Access Publisher, 2012. – 418 p.
- Ворошнин Л.Г. Борирование сталей и чугунов: Справ. пособие. – Минск: Изд-во Беларусь, 1981. – 205 с.
- López-Chipresa E., Mejía I., Maldonado C. etc. Hot flow behavior of boron microalloyed steels // *Materials Science and Engineering A*. 2008. Vol. 480. P. 49 – 55.
- Gopalakrishnan P., Shankar P., Palaniappa M., Ramakrishnan S.S. Interrupted boriding of medium-carbon steels // *Metallurgical and Materials Transactions*. 2002. Vol. 33A. No. 5. P. 1475 – 1485.
- Kartal G., Eryilmaz O.L., Krumdick G. etc. Kinetics of electrochemical boriding of low carbon steel // *Applied Surface Science*. 2011. Vol. 257. P. 6928 – 6934.
- Yeh C.L., Wang H.J. Preparation of borides in Nb-B and Cr-B systems by combustion synthesis involving borothermic reduction of Nb₂O₅ and Cr₂O₃ // *Journal of Alloys and Compounds*. 2010. Vol. 490. P. 366 – 371.
- А.с. 1712461 СССР, С23С8/70. Минков А.Н., Колесник Н.М., Гатченко А.Е. Способ борирования стальных изделий; заявл. 09.10.1987; опубл. 15.02.1992. Бюл. № 6.

Поступила в редакцию 4 февраля 2018 г.
 После доработки 1 августа 2019 г.
 Принята к публикации 3 августа 2019 г.

CHOICE OF TEMPERATURE AND TIME CONDITIONS OF HEATING FOR THE COMBINED PROCESS OF BORATING AND VOLUME TRAINING OF LARGE STAMPS OF 5KhNM STEEL

K.A. Minkov¹, A.N. Minkov², A.A. Khlybov³

¹ JSC “Ruspolimet”, Kulebaki, Nizhny Novgorod Region, Russia

² Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Donetsk Region, Ukraine

³ Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The stamps for hot deformation are widely adopted in industry. In use they are affected by high temperatures, tension (close to a fluidity limit) and variable thermal loadings. High-hardenability tool steels with high mechanical characteristics are used for stamps production. In this article, the possibility of use of 5KhNM steel for this goal is considered. One of technological operations at production of stamps is training in oil. It is rational to apply volume and superficial hardening, in particular chemical heat treatment, to improve operational characteristics of stamps, including wear resistance. The way of superficial hardening by the combined heating under chemical and thermal and heat treatment is presented. As a superficial way of hardening of large-size stamps of hot deformation, it is offered to use borating. Optimum temperature and time parameters of heating under the combined heat treatment are chosen and confirmed. The offered mode of chemical heat treatment allows receiving the necessary thickness of the borated layer providing high hardness and corrosion resistance in the working range of temperatures of a stamp. Also the influence of heat treatment on structure and grain size of the samples has been researched. It is shown that with increase in temperature and hold time, the size of grain increases. It leads to decrease in strength, fluidity, hardness and impact strength that can negatively influence operational properties of stamps. For definition of mechanical characteristics, the samples (in the studied range of temperatures and excerpts) have been tested for stretching and impact strength. All tests were carried out according to the existing state standard specifications. On the basis of these results, temperature and time of borating are chosen providing high mechanical properties and thickness of a borated layer. The offered approach has allowed reducing economic costs of stamps production from 5KhNM steel by exception from technological process of repeated heating for training with saving the required operational characteristics of large-size stamps.

Keywords: borating, stamp, volume training, tempering, temperature, time, steel.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-9-681-685

REFERENCES

- Okolovich G.A. *Shtampovyye stali dlya kholodnogo deformirovaniya metallov: Monografiya* [Stamp steels for cold deformation of metals: Monograph]. Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2010, 202 p. (In Russ.).
- Lakhtin Yu.M. *Materialovedenie: ucheb.* [Materials science: Textbook]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 528 p. (In Russ.).
- Geller Yu.A. *Instrumental'nye stali* [Tool steels]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 584 p. (In Russ.).
- Mintz B. The influence of composition on the hot ductility of steel and to the problem of transverse cracking. *ISIJ International*. 1999, vol. 39, no. 9, pp. 833–855.
- Fleischer R.L., Hibberd W.R. *The relation between the structure and mechanical properties of metals*. H.M.S.O., 1963, 203 p.
- Topolyanskii P.A., Topolyanskii A.P., Ermakov S.A., Sosnin N.A. Increase in firmness of the tool for cold volume stamping. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2014, no. 3, pp. 22–32. (In Russ.).
- Gadalov V.N., Emel'yanov S.G., Romanenko D.N., Rozina T.N. Wear and increase in firmness of stamps. In: *Novye resheniya v oblasti uprochnyayushchikh tekhnologii* [New decisions in strengthening technologies]. Vol. 1. Kursk: Universitetskaya kniga, 2016, pp. 46–48. (In Russ.).
- Gur'ev A.M., Lygdenov B.D., Vlasova O.A. Improvement of technology of chemical heat treatment of tool steels. *Obrabotka metallov*. 2009, no. 1, pp. 14–15. (In Russ.).
- Bogdanova T.A., Pereboeva A.A., Tret'yakova L.P., Okladnikova N.V. Research of structure and properties of stamp tool steels. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva*. 2009, no. 2, pp. 239–241. (In Russ.).
- Popova L.E., Popov A.A. *Diagrammy prevrashcheniya austenita v stalyakh i β -rastvora v splavakh titana: spravochnik termista* [Transformation diagrams of austenite in steels and β -solution in alloys of the titan: Reference book of heat-treater]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 503 p. (In Russ.).
- Sourmail T., Smanio V. Low temperature kinetics of bainite formation in high carbon steels. *Acta Materialia*. 2013, vol. 61, no. 7, pp. 2639–2648.
- Yang B., Degischer H.P., Presslinger H., Xia G., Reisinger P. Influence of chemical composition on high temperature tensile properties of carbon steels. *BHM Berg- und Huttenmannische Monatshefte*. 2005, vol. 150, no. 9, pp. 313–320.
- Thermochemical Surface Engineering of Steels*. Mittemeijer Eric J., Somers Marcel A.J. eds. Woodhead Publishing, 2015, 827 p.
- Czerwinski F. *Thermochemical Treatment of Metals*. INTECH Open Access Publisher, 2012, 418 p.
- Voroshnin L.G. *Borirovanie staley i chugunov: sprav. posobie* [Borating of steel and pig iron: Reference book]. Minsk: Izd-vo Belarus', 1981, 205 p. (In Russ.).
- López-Chipres E., Mejía I., Maldonado C. etc. Hot flow behavior of boron microalloyed steels. *Materials Science and Engineering A*. 2008, vol. 480, pp. 49–55.
- Gopalakrishnan P., Shankar P., Palaniappa M., Ramakrishnan S.S. Interrupted boriding of medium-carbon steels. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2002, vol. 33A, no. 5, pp. 1475–1485.
- Kartal G., Eryilmaz O.L., Krumdick G., Erdemir A., Timur S. Kinetics of electrochemical boriding of low carbon steel. *Applied Surface Science*. 2011, vol. 257. P. 6928–6934.
- Yeh C.L., Wang H.J. Preparation of borides in Nb-B and Cr-B systems by combustion synthesis involving borothermic reduction of Nb₂O₅ and Cr₂O₃. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010, vol. 490, pp. 366–371.
- Minkov A.N., Kolesnik N.M., Gatchenko A.E. *Sposob borirovaniya stal'nykh izdelii* [Method of steel products borating]. Certificate of authorship USSR no. 1712461, S23S8/70. *Byulleten' izobretenii*. 1992, no. 6. (In Russ.).

Information about the authors:

Minkov K.A., Senior Engineer (k.minkov@ruspolymet.ru)

Minkov A.N., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Materials Science and Heat Treatment of Metals” (minkov46@mail.ru)

Khlybov A.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Materials Science, Technology of Materials and Heat Treatment of Metals” (hlybov_52@mail.ru)

Received February 4, 2018

Revised August 1, 2019

Accepted August 3, 2019