

ОСОБЕННОСТИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МИКРООБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ КЛАССОВ

Ф. И. Пантелеенко¹, М. Н. Карпец²

¹ Член-корреспондент НАН Беларуси, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов» Белорусского национального технического университета, г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: panteleyenkofi@bntu.by

² М. т. н., аспирант Белорусского национального технического университета, заместитель начальника лаборатории технической диагностики и наладки ОАО «Беларуськалий», г. Солигорск, Республика Беларусь, e-mail: mail-maxiolis@mail.ru

Реферат

Одним из способов повышения надежности и долговечности деталей машин, инструмента и технологической оснастки является химико-термическая обработка (ХТО). Для упрочнения стальных деталей различного назначения широкое распространение получило термодиффузионное легирование бором. Традиционными объектами ХТО являются макродетали, для которых толщина диффузионного слоя на несколько порядков меньше линейных размеров детали. В последнее время активно развивается новое направление ХТО – диффузионное легирование микрообъектов. Переход от макроуровня к микроуровню принципиально изменяет технологию ХТО.

В данной работе были исследованы процессы диффузионного легирования бором микрообъектов, в частности изделий с сечением в форме круга (проволок) различных структурных классов. По результатам исследований были определены факторы, оказывающие влияние на толщину боридных слоёв. Определена интенсивность борирования микрообъектов различных структурных классов.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, диффузионное легирование, борирование, поверхностное упрочнение.

FEATURES OF CHEMICAL AND THERMAL TREATMENT OF MICRO-OBJECTS OF DIFFERENT STRUCTURAL CLASSES

F. I. Panteleenko, M. N. Karpets

Abstract

One of the ways to increase the reliability and durability of machine parts, tools and technological equipment is chemical heat treatment. For hardening steel parts for various purposes, thermal diffusion alloying with boron is widely used. Traditional objects of chemical and thermal treatment are macro-parts, for which the thickness of the diffusion layer is several orders of magnitude less than the linear dimensions of the part. Recently, a new direction of chemical treatment is actively developing - diffusion alloying of micro-objects. The transition from the macrolevel to the microlevel fundamentally changes the diffusion alloying technology.

In this work, we investigated the processes of diffusion alloying with boron of micro-objects, in particular, products with a circular cross-section (wires) of various structural classes. According to the research results, the factors influencing the thickness of boride layers were determined. The intensity of boriding of micro-objects of various structural classes has been determined.

Keywords: chemical heat treatment, diffusion alloying, boriding, surface hardening.

Введение

Химико-термическая обработка (ХТО) является одним из наиболее эффективных и широко применяемых в промышленности методов повышения надёжности и долговечности ответственных деталей машин, инструмента и технологической оснастки за счёт получения требуемых эксплуатационных свойств поверхностных слоёв (повышенной твердости, износостойкости, коррозионной и эрозийной стойкости и других). Существующие методы ХТО можно разделить на четыре основные группы: насыщение в твёрдых, жидких, газовых средах и в плазме. Особенности каждого метода обусловлены агрегатным состоянием насыщающей среды и свойствами веществ-компонентов [1].

Традиционными объектами ХТО являются макродетали, для которых толщина диффузионного слоя на несколько порядков меньше линейных размеров детали. Целью традиционной ХТО является изменение химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя детали на незначительную глубину. Такая поверхностно-упрочнённая деталь, как правило, является конечным продуктом технологии. В общем комплексе решаемых задач химический состав упрочнённого слоя имеет второстепенное значение по сравнению с эксплуатационными свойствами последнего. В последнее время активно развивается новое направление ХТО – диффузионное легирование микрообъектов. Под микрообъектами ХТО понимают дискретные микрообъёмы твёрдых тел, линейные размеры которых соизмеримы с толщиной формируемого диффузионного слоя. Наиболее часто микрообъектами ХТО являются различные порошки. К микрообъектам ХТО с некоторыми допущениями также следует отнести изделия с сечением в форме круга, например, проволоку

малых диаметров, поскольку хотя бы один линейный размер в этом случае соизмерим с толщиной диффузионного слоя [2].

Переход от макроуровня к микроуровню принципиально изменяет технологию ХТО. В этом случае целью ХТО на микроуровне является получение в первую очередь требуемого химического состава диффузионного слоя. Механические свойства диффузионного слоя на микрообъекте, как правило, решающего значения не имеют. А сама ХТО становится промежуточной операцией, после которой следует основная операция формирования защитного слоя. К настоящему времени обозначились два характерных направления ХТО микрообъектов: получение синтетических насыщающих порошковых смесей методами ХТО для последующей диффузионной обработки макродеталей и диффузионное легирование металлических порошков для последующей наплавки (напыления) или получения деталей методами порошковой металлургии [2]. Для упрочнения стальных деталей различного назначения широкое распространение получило термодиффузионное легирование бором [3], недостаточно полностью изученное для изделий в форме круга.

Целью данной работы является исследование процесса диффузионного легирования бором изделий с сечением в форме круга (проволоки) различных структурных классов.

Основная часть

Для проведения исследований были выбраны проволоки различных структурных классов следующих марок: Св-08А Ø 3,0 мм (ферритно-перлитный класс), Св-08Г2С Ø 1,6 мм (ферритно-перлитный класс), 95Х18 Ø 1,6 мм (мартенситный класс), ER2209 Ø 1,2 мм (аустенитно-ферритный класс), ER316LSi Ø 1,2 мм и ER 347 Ø 1,2 мм (аустенитный класс). Химический состав проволок приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав применяемых проволок [4–6]

Марка проволоки	Массовая доля химических элементов, %									
	Mn	Mo	Cu	C	Si	Ni	Cr	Ti	Al	Nb
Св-08А	0,35–0,6	–	–	<0,1	<0,03	<0,25	<0,12	–	<0,01	–
Св-08Г2С	1,8–2,1	–	–	0,05–0,11	0,7–0,95	<0,25	<0,2	–	–	–
ER347	1,7	0,1	0,1	0,04	0,7	9,8	19	–	–	0,6
ER316LSi	1,80	2,60	0,12	0,01	0,9	12,2	18,4	–	–	–
ER2209	1,70	3,30	<0,3	<0,025	0,50	8,50	22,5	–	–	–
95Х18	<0,8	–	<0,3	0,9–1,0	<0,8	<0,6	17–19	<0,2	–	–

Каждую марку проволоки подвергали диффузионному легированию бором (борированию) в контейнере с герметизирующим плавким затвором. В качестве насыщающей среды применялся технический карбид бора (В4С). ХТО выполнялась при различных температурно-временных режимах в камерной электрической печи Термоскале КГ360/1100С. Как известно, для ускорения интенсивности диффузионного насыщения рекомендуется применять галогенсодержащие активаторы в количестве не более 1,5 % [7]. Поэтому при проведении исследований в качестве активатора был выбран фтористый алюминий (AlF3) в количестве 1 %.

После борирования металлографическим способом выполнялось измерение толщины боридного слоя для всего диапазона использованных режимов диффузионного легирования.

Металлографические исследования. Металлографические исследования на предмет толщины боридного слоя выполнялись с применением микроскопа МИ-1 и микроскопа «Альтами МЕТ П». Для получения и анализа изображений применялось программное обеспечение «SIAMS 800» и Altami Studio.

По результатам металлографических исследований для каждой из марки проволоки была определены толщины боридных слоев (таблица 2).

Таблица 2 – Толщина боридных слоев в зависимости от режимов диффузионного легирования

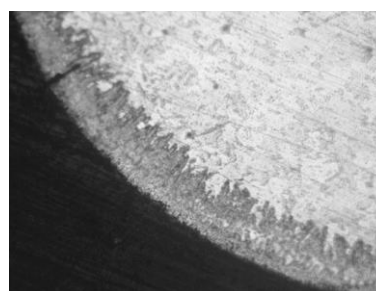
Марка проволоки	Температура ХТО, °С														
	850					900					950				
	Время выдержки, мин					Время выдержки, мин					Время выдержки, мин				
	30	60	120	180	240	30	60	120	180	240	30	60	120	180	240
Св-08А	10	13	20	28	40	20	25	32	40	52	30	50	80	130	160
Св-08Г2С	10	14	19	27	38	20	27	35	48	62	30	45	80	120	150
ER347	8	10	13	16	21	12	15	19	24	30	16	18	25	30	50
ER316	7	9	12	15	20	11	14	17	21	27	15	18	25	35	50
ER2209	6	8	11	15	20	8	11	15	20	27	15	18	22	28	35
95Х18	6	8	12	15	20	9	12	16	21	28	14	18	20	32	40

Проволоки ферритно-перлитного класса (Св-08А и Св-08Г2С).

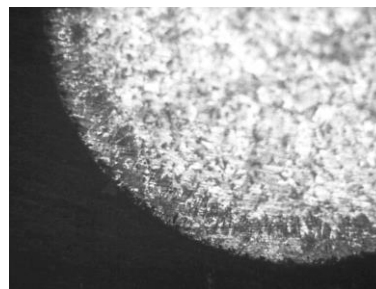
После диффузионного легирования боридный слой имеет характерное игольчатое строение. Иглы (конусы) боридов, срастаясь у основания, образуют сплошной боридный слой (рисунок 1). Учитывая, что борирование выполнялось в порошкообразной смеси на основе технического карбида бора, боридный слой имеет двухфазное строение (FeB+Fe2B) [9].

Из всех исследуемых проволок при одинаковых режимах борирования на проволоках ферритно-перлитного класса (Св-08А и Св-08Г2С) удалось получить наибольшую толщину боридного слоя. Это объясняется невысоким содержанием легирующих элементов и углерода в их составе. Как известно, при концентрации углерода в стали от 0,04 до 0,1 % он не оказывает существенного влияния на толщину боридного слоя. Марганец незначительно снижает толщину боридного слоя. В тоже время кремний при его содержании от 0,5 до 4,0 % существенно снижает толщину боридного слоя [8]. Изначально предполагалось, что толщина боридного слоя в этих проволоках будет существенно отличаться, поскольку в составе проволоки марки Св-08Г2С имеется большее содержание элементов, замедляющих диффузию, а именно марганца (на 1,5 %) и кремния (на 0,7–0,9 %). Однако в зависимости от температуры борирования было выявлено, что при температуре 850 °С толщина боридных слоев практически не отличается (рисунок 2). При температуре 900–950 °С, с увеличением

времени выдержки, толщина боридных слоев на этих проволоках отличается незначительно (до 10 мкм).



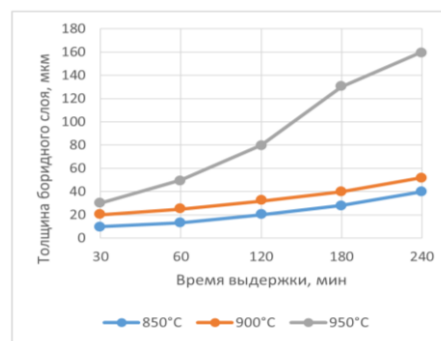
а)



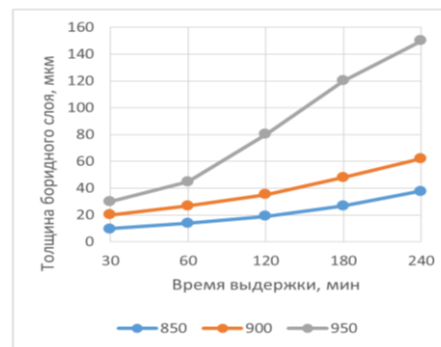
б)

а) проволока Св-08А; б) проволока Св-08Г2С

Рисунок 1 – Микроструктура проволоки после выдержки при температуре 950 °С в течение 240 мин, увеличение x100



а)



б)

а) проволока Св-08А; б) проволока Св-08Г2С

Рисунок 2 – Влияние температуры и времени выдержки на толщину боридного слоя

Вероятно, незначительное отличие толщин боридного слоя можно объяснить различием в диаметрах проволок (1,6 мм Св-08Г2С против 3,0 мм Св-08А), при котором в проволоке Св-08А с большим диаметром поверхностная диффузия [8] протекала медленнее.

В тоже время при максимальной температуре и времени выдержки максимальный боридный слой (160 мкм) образовался на проволоке марки Св-08А.

Проволока мартенситного класса (95Х18). По результатам исследований для данной проволоки была замечена низкая интенсивность увеличения боридного слоя во всех температурных и временных диапазонах (рисунок 3).

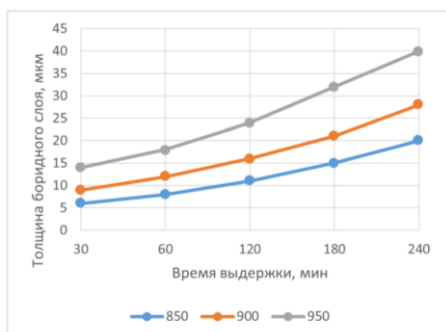


Рисунок 3 – Влияние температуры и времени выдержки на толщину боридного слоя на проволоке 95Х18

Это объясняется высоким содержанием углерода (0,9–1,0 %), который при содержании более 0,8 % интенсивно снижает толщину боридного слоя. Снижение интенсивности связано с образованием борного цементита в подборидной зоне, причиной появления которого является повышение концентрации углерода и бора выше предельной растворимости их в аустените при температуре борирования. Борный цементит механически препятствует проникновению боридных игл и росту боридного слоя [8]. Кроме углерода интенсивность борирования уменьшается за счет высокого содержания хрома (17–19 %), который также уменьшает толщину проникновения боридных игл и делает боридный слой более компактным. Поэтому боридный слой на данной проволоке не имеет игольчатой структуры (рисунок 4). Кроме того, наличие хрома в данной проволоке охрупчивает боридный слой.

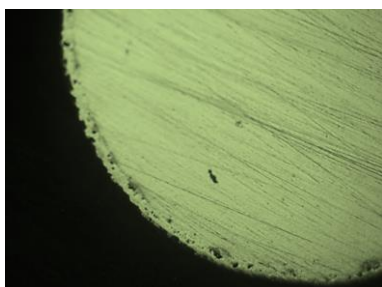


Рисунок 4 – Микроструктура проволоки 95Х18 после выдержки при температуре 950 °C в течение 240 мин, увеличение x100

Проволока аустенитно-ферритного класса (ER2209). По результатам исследований была замечена низкая интенсивность увеличения боридного слоя во всех температурных и временных диапазонах (рисунок 5).

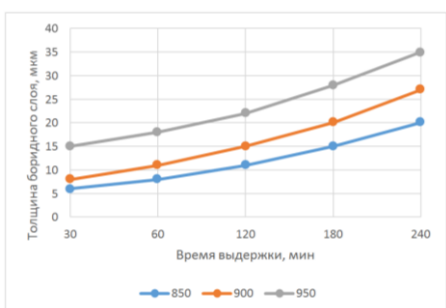


Рисунок 5 – Влияние температуры и времени выдержки на толщину боридного слоя на проволоке ER2209

Это объясняется высоким содержанием легирующих элементов, уменьшающим интенсивность борирования. Содержащийся в проволоке хром (22,5 %) существенно уменьшает толщину проникновения боридных игл и делает боридный слой более компактным и хрупким [8]. На рисунке 6 видны сколы боридного слоя вследствие механической подготовки образца к металлографическим исследованиям.

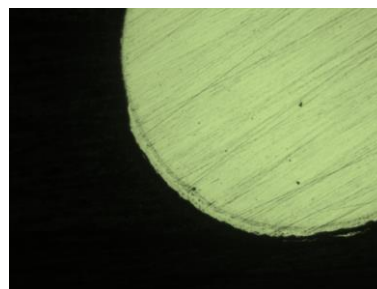
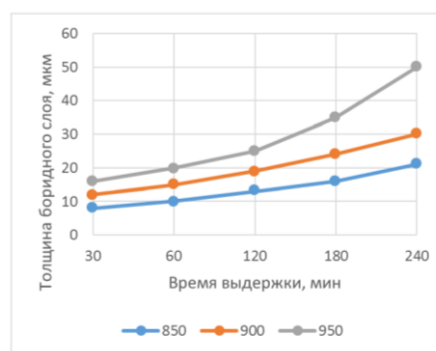


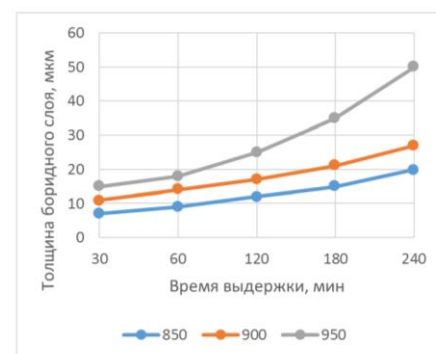
Рисунок 6 – Микроструктура проволоки ER2209 после выдержки при температуре 950 °C в течение 240 мин, увеличение x100

Содержащийся в проволоке молибден (3,3 %) также снижает толщину слоя боридов. Никель и марганец, в том количестве, в котором они содержатся в данной проволоке, не оказывают существенного влияния на толщину боридного слоя [8].

Проволока аустенитного класса (ER347 и ER316LSi). Из всех исследуемых высоколегированных нержавеющей проволоки при одинаковых режимах борирования на проволоках аустенитного класса (ER347 и ER316LSi) удалось получить наибольшую толщину боридного слоя (рисунок 7).



а)



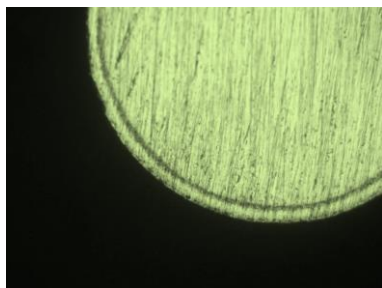
б)

а) проволока ER347; б) проволока ER316LSi

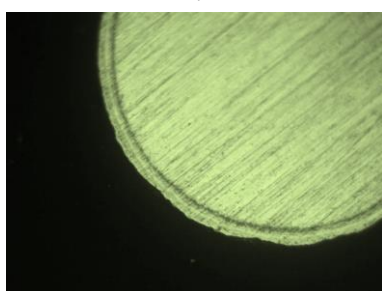
Рисунок 7 – Влияние температуры и времени выдержки на толщину боридного слоя

Высокое содержание легирующих элементов значительно уменьшает интенсивность борирования. Содержащийся в проволоках ER347 и ER316LSi хром (19 % и 18,4 % соответственно) существенно уменьшает толщину проникновения боридных игл и делает

боридный слой более компактным и хрупким. Кроме того, содержащийся в проволоке ER316LSi молибден (2,6 %), а в проволоке ER347 ниобий (0,6 %) также снижают толщину слоя боридов. Никель и марганец в том количестве, в котором они содержатся в данных проволоках, не оказывают существенного влияния на толщину боридного слоя [8]. Боридный слой в обеих проволоках практически лишен игольчатого строения, характерного для сплавов на основе железа (рисунок 8).



а)



б)

а) проволока ER347; б) проволока ER316LSi

Рисунок 8 — Микроструктура проволоки после выдержки при температуре 950 °С в течение 240 мин, увеличение x100

Заключение

По результатам проведенных испытаний можно установить, что на толщину диффузионного (боридного) слоя существенное влияние оказывают режимы ХТО (температура, время выдержки), химический состав и диаметр проволоки. Наибольшая интенсивность борирования наблюдается у проволок ферритно-перлитного класса (Св-08Г2С и Св-08А). Высоколегированные нержавеющие проволоки ER2209, ER316LSi, ER347, 95X18 борированы с меньшей интенсивностью, что связано с достаточно высоким содержанием элементов, снижающих интенсивность борирования. Для проволок ER2209, ER316LSi элементами, снижающими интенсивность борирования, являются хром и молибден. Для проволоки 95X18 элементами, снижающими интенсивность борирования, являются хром и углерод. Для проволоки ER347 элементами, снижающими интенсивность борирования, являются хром и ниобий. При борировании высоколегированных проволок, содержащих хром и молибден, необходимо учитывать фактор охрупчивания боридного слоя.

Список цитированных источников

1. Ворошнин, Л. Г. Теория и технология химико-термической обработки : учебное пособие / Л. Г. Ворошнин, О. Л. Менделеева, В. А. Сметкин. – М. : Новое знание; Минск : Новое знание, 2010. – 304 с. : ил. – (Техническое образование).
2. Ворошнин, Л. Г. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л. Г. Ворошнин, Ф. И. Пантелеенко, В. М. Константинов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск : ФТИ ; Новополоцк : ПГУ, 2001. – 148 с.
3. Константинов, В. М. Применение борирования в порошковой среде для упрочнения стальных деталей различного назначения / В. М. Константинов, В. Г. Дашкевич, А. В. Ковальчук // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сборник научных трудов : в 3 кн. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2015. – Кн. 1 : Материаловедение. – С. 33–38.

4. Проволока стальная варочная. Технические условия : ГОСТ 2246-70. – Взамен ГОСТ 2246-60 ; введ. 01-01-73. – М. : ИПК изд-во стандартов, 2004. – с. 20. – (Межгосударственный стандарт).
5. Компания ESAB. Продукция и решения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.esab.ru/ru/ru/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/stainless-steel-wires/ok-autrod-316lsi.cfm>. – Дата доступа: 14.09.2021.
6. Центральный металлический портал РФ. Марки стали и сплавы. Сталь марки 95X18 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://metallicheskiy-portal.ru/marki_metallov/stn/95X18. – Дата доступа: 14.09.2021.
7. Пантелеенко, Ф. И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия на них / Ф. И. Пантелеенко. – Минск : УП «Технопринт», 2001. – 300 с.
8. Ворошнин, Л. Г. Борирование промышленных сталей и чугунов / Л. Г. Ворошнин. – Минск : Беларусь, 1981. – 205 с.
9. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Справочник / Г. В. Борисенко [и др.]. – М. : Metallurgiya, 1981. – 424 с.

References

1. Voroshnin, L. G. Teoriya i tekhnologiya himiko-termicheskoy obrabotki : uchebnoe posobie / L. G. Voroshnin, O. L. Mendeleeva, V. A. Smetkin. – M. : Novoe znanie; Minsk : Novoe znanie, 2010. – 304 s. : il. – (Tekhnicheskoe obrazovanie).
2. Voroshnin, L. G. Teoriya i praktika polucheniya zashchitnykh pokrytij s pomoshch'yu HTO / L. G. Voroshnin, F. I. Panteleenko, V. M. Konstantinov. – 2-e izd., pererab. i dop. – Minsk : FTI ; Novopolock : PGU, 2001. – 148 s.
3. Konstantinov, V. M. Primenenie borirovaniya v poroshkovej srede dlya uprochneniya stal'nykh detalej razlichnogo naznacheniya / V. M. Konstantinov, V. G. Dashkevich, A. V. Koval'chuk // Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov : sbornik nauchnykh trudov : v 3 kn. – Minsk : FTI NAN Belarusi, 2015. – Kn. 1 : Materialovedenie. – S. 33–38.
4. Provoloka stal'naya varochnaya. Tekhnicheskie usloviya : GOST 2246-70. – Vzaмен GOST 2246-60 ; vved. 01-01-73. – M. : IPK izd-vo standartov, 2004. – s. 20. – (Mezhgosudarstvennyj standart).
5. Kompaniya ESAB. Produkciya i resheniya [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.esab.ru/ru/ru/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/stainless-steel-wires/ok-autrod-316lsi.cfm>. – Data dostupa: 14.09.2021.
6. Central'nyj metallicheskiy portal RF. Marki stali i splavy. Stal' marki 95H18 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://metallicheskiy-portal.ru/marki_metallov/stn/95X18. – Data dostupa: 14.09.2021.
7. Panteleenko, F. I. Samoflyusuyushchiesya diffuzionno-legirovannye poroshki na zheleznoj osnove i zashchitnye pokrytiya na nih / F. I. Panteleenko. – Minsk : UP «Tekhno-print», 2001. – 300 s.
8. Voroshnin, L. G. Borirovanie promyshlennykh staley i chugunov / L. G. Voroshnin. – Minsk : Belarus', 1981. – 205 s.
9. Himiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov. Spra-vochnik / G. V. Borisenok [i dr.]. – M. : Metallurgiya, 1981. – 424 s.

Материал поступил в редакцию 19.01.2022