УПРАВЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКИМ ЦИКЛОМ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ*

М. В. ИЛЬИЧЕВ, канд. техн. наук, научный сотрудник;
А. С. ТЮФТЯЕВ, д-р техн. наук, заведующий отделом;
Д. И. ЮСУПОВ, канд. техн. наук, научный сотрудник, yusupovDI@ihed.ras.ru
(Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, г. Москва)

Аннотация. Проблема повышения сопротивления разрушению и износостойкости металлических изделий приобретает особую значимость в связи с непрерывно возрастающими требованиями к их надежности и долговечности. Традиционные методы объемного упрочнения элементов конструкций в значительной степени исчерпали свои возможности. В то же время их ресурс, например, в условиях повышенного износа, определяется главным образом структурой и свойствами рабочей поверхности и может быть повышен при использовании плазменного поверхностного упрочнения металлических изделий. Плазменное поверхностное упрочнение металлических изделий — типичный пример технологии, охватывающей сферы физики плазмы, гидродинамики, теории теплообмена, металлофизики, металловедения. Сложность его математического моделирования и численного расчета обусловлена обширностью протекающих процессов: от масштабов кристаллической решетки до масштабов устройства для плазменной обработки. По этой причине представляется важным и актуальным экспериментальный подход к решению ряда конкретных задач, позволяющих оптимизировать устройства для плазменной обработки и технологический процесс в целом. Представлены результаты исследования влияния конфигурации выходного канала устройства для плазменной поверхностной обработки и режимов обработки на структуру и свойства металла поверхности при плазменной термической обработке. Определены формы выходного канала преобразователя потока плазматрона и режимы обработки, при которых полученные образцы демонстрируют наиболее высокий уровень твердости и износостойкости поверхности при испытаниях на сухое трение и изнашивание полужакопленным абразивом. Показано, что изменение конфигурации выходного канала устройства для плазменной поверхностной обработки наряду с технологическими параметрами режима (скорость перемещения плазматрона, мощность плазматрона и расход плазмообразующего газа) позволяет эффективно управлять термическим циклом, обеспечивающим формирование требуемых свойств поверхности обрабатываемого изделия. Дано обоснование полученных результатов на основе анализа структуры металла упрочненного слоя. Испытания на истирание полужакопленным абразивом показали, что плазменная обработка поверхности дает существенный прирост износостойкости — до 3 раз по сравнению с неупрочненным металлом.

Ключевые слова: плазматрон, плазменное поверхностное упрочнение, износостойкость металлических изделий, структура металла упрочненного слоя, абразивный износ.

Ссылка для цитирования. Ильичев М.В., Тюфтяев А.С., Юсупов Д.И. Управление термическим циклом при поверхностной плазменной обработке высокоуглеродистой стали // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 12. С. 81–88.

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-12-81-88

THERMAL CYCLE CONTROL AT SURFACE PLASMA TREATMENT OF HIGH CARBON STEEL *

M. V. IL'ICHEV, PhD (Tech), Research Ass., A. S. TYUFTYAEV, HD (Tech), Head of Dpt,
D. I. YUSUPOV, PhD (Tech), Research Ass., yusupovDI@ihed.ras.ru
(United Institute of High Temperatures of RAN, Russia, Moscow)

Abstract. The problem of crack strength and wear resistance of metal products increase becomes particular significance in relation to continuously increasing requirement to their reliability and long service time. Traditional methods of volume strengthening of structure elements mainly exhausted their capacity. At the same time their resource, for example, under high wear conditions, is determined mainly by the structure and working surface properties and can be increased by application of plasma surface strengthening of metal products. Plasma surface strengthening of metal products is a typical of a technology covering spheres of plasma physics, hydrodynamics, theory of heat exchange, metal science. Complication of its mathematical simulation and digital calculation is stipulated by extensiveness of processes taking place: from crystal lattice scale till plasma treatment facility scale. By this reason experimental approach to solving a series of particular problems, enabling for optimizing plasma treatment facilities and technological process in the whole is important and actual. Results of influence study of outlet channel configuration of plasma treatment facility and treatment regimes on the structure and properties of metal surface after plasma thermal treatment presented.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант №16-08-00166).

Forms of flow transformer outlet channel of plasmatron determined, providing the samples obtained demonstrated the highest level of surface hardness and wear resistance, during dry friction tests and wear test by semi-fixed abrasive material. It was shown, that change of the plasma treatment facility outlet channel configuration enables to effectively control the technological parameters (plasmatron travelling speed, plasmatron power and plasma-forming gas consumption), as well as the thermal cycle, which provides forming of required surface properties of treated detail. A basis of the results obtained based on the analysis of strengthened layer metal structure presented. Abrasion tests by a semi-fixed abrasive material showed, that surface plasma treatment gives a considerable wear resistance growth – up to 3 times comparing with a non-strengthened metal.

Key words: plasmatron, plasma surface strengthening, wear resistance of metal products, strengthened layer metal structure, abrasive wear.

For citation: Il'ichev M.V., Tyufyaev A.S., Yusupov D.I. Thermal cycle control at surface plasma treatment of high carbon steel. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii* = *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 12, pp. 81–88. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-12-81-88

Проблема повышения сопротивления разрушению и износостойкости изделий приобретает особую значимость в связи с непрерывно возрастающими требованиями к их надежности и долговечности.

Производство массивных изделий сопряжено с большим расходом металла и сложностью сборки самой конструкции (железнодорожные колеса, ролики транспортных рольгангов прокатных станов и др.) [1–3]. Традиционные методы объемного упрочнения элементов таких конструкций в значительной степени исчерпали свои возможности. В то же время их ресурс, например, в условиях повышенного износа, определяется главным образом структурой и свойствами рабочей поверхности.

Плазменное поверхностное упрочнение металлических изделий — типичный пример технологии, охватывающей сферы физики плазмы, гидродинамики, теории теплообмена, металло-

физики, металловедения [4]. Сложность математического моделирования и численного расчета здесь обусловлена обширностью протекающих процессов: от масштабов кристаллической решетки до масштабов устройства для плазменной обработки [5]. По этой причине представляется важным и актуальным экспериментальный подход к решению ряда конкретных задач, позволяющих оптимизировать устройство для плазменной обработки и технологический процесс в целом.

В данной работе для плазменной поверхностной обработки использовали устройство (рис. 1), которое включает в себя плазматрон с расширяющимся каналом выходного электрода и преобразователь потока 5, функционально являющийся гидравлическим переходным участком, соединенным с выходным электродом 4 и образующий с ним общий внутренний канал со щелевым отверстием, что обеспечивает обработку изделия в виде полосы [6, 7].

Рис. 1. Устройство для плазменной обработки:
плазматрон: 1 — корпус; 2 — катод; 3 — изолятор; 4 — анод; 5 — преобразователь потока;
6 — коллектор преобразователя ($B = 10, 25$ и 40 мм); 7 — калориметр

Fig. 1. Facility for plasma treatment:
plasmatron: 1 — body; 2 — cathode; 3 — isolator; 4 — anode; 5 — flow transformer; 6 — transformer collector
($B = 10, 25$ and 40 mm); 7 — calorimeter

Высота преобразователя определяется длиной щелевого отверстия, а конфигурация внутреннего канала выполнена таким образом, что по его высоте сохраняются постоянными газодинамические параметры потока низкотемпературной плазмы. Торцевая поверхность преобразователя снабжена продольными буртиками, которые позволяют осуществлять точное позиционирование устройства относительно обрабатываемого изделия, что важно для качества и стабильности процесса плазменной обработки. Высота торцевых буртиков выбирается из условия эффективности передачи тепла обрабатываемой поверхности, а расстояние между торцевыми буртиками определяется условием, по которому площадь сечения выходных отверстий газового коллектора, образованного буртиками, была бы не меньше площади сечения щелевого отверстия преобразователя.

Газовый коллектор, геометрия которого определяется высотой буртиков и расстоянием между ними, имеет функцию распределения отходящих потоков газа в стороны, перпендикулярные скорости движения плазмотрона V . При этом, изменяя геометрические размеры коллектора, положение щелевого отверстия внутри него и режим обработки (скорость перемещения плазмотрона V , мощность плазмотрона N и расход плазмообразующего газа G), можно регулировать время предварительного нагрева $T_{\text{пр}} = A/V$, общее время термического воздействия на поверхность $T_{\text{общ}} = B/V$, время завершающего нагрева $T_{\text{зав}} = C/V$ (где A — расстояние от переднего буртика до щелевого отверстия; B — ширина щелевого отверстия; C — расстояние от заднего буртика до щелевого отверстия). С помощью этих параметров можно изменять циклы термической обработки и таким образом получать различные структуры и свойства металла обрабатываемой поверхности.

На практике преобразователь потока создается для обработки конкретного изделия. При проектировании формы и размеров газового тракта преобразователя исходят из необходимости создания потока низкотемпературной плазмы, формирующего требуемые размеры зоны термического влияния (ЗТВ) на обрабатываемом изделии, обеспечения минимальных тепловых потерь и технологичности его изготовления.

Для разработки технологии упрочнения и прогнозирования работоспособности изделий важны сведения как о влиянии параметров режима на структуру, свойства упрочненного поверхностного слоя, так и об эффективности процесса: энергетических параметрах устройств и производительности при обработке.

Для экспериментов были изготовлены преобразователи потока с симметрично расположен-

ным относительно щелевого отверстия коллектором, ширина которого варьировалась от 10 до 40 мм при неизменной высоте продольных буртиков.

При моделировании распределения температур в образце при воздействии на него струи низкотемпературной плазмы, вытекающей из щелевого отверстия преобразователя, необходимы исходные данные по распределению удельных тепловых потоков в образец при разных размерах коллектора. Для выполнения этой задачи был изготовлен шестисекционный калориметр и разработана методика [8], позволяющие получать данные о распределении удельных тепловых потоков в зоне нагрева изделия.

На рис. 2 и 3 представлено распределение тепловых потоков в образце вдоль и поперек плоской струи низкотемпературной плазмы при ширине газового коллектора $B = 10, 25$ и 40 мм, высоте буртиков — 4 мм, ширине симметрично расположенного щелевого отверстия преобразователя — $2,5$ мм, длине щелевого отверстия преобразователя — 35 мм, мощности плазмотрона — 33 кВт и расходе азота — $1,6$ г/с.

Рис. 2. Распределение тепловых потоков преобразователя с различной шириной коллектора ($B = 10, 25, 40$ мм) вдоль щелевого отверстия

Fig. 2. Distribution of heat flows of the transformer with different collector width ($B = 10, 25, 40$ mm) along the slot opening

Установлено, что использование преобразователя с буртиками высотой $h = (1,1 \div 1,4)a$, длиной $L = (1,0 \div 1,2)a$ и расстоянием между ними $B = (0,3 \div 0,5)ab/h$, где a и b — длина и ширина щелевого отверстия соответственно, дает возможность получить равномерное распределение теплового потока вдоль щели, что важно для получения оптимальных характеристик упрочненного слоя.

На рис. 4 представлено полученное в процессе эксперимента распределение тепловых потоков преобразователей с шириной коллек-

тора $B = 10$ мм поперек щелевого отверстия, расположенного симметрично и несимметрично относительно щелевого отверстия.

Рис. 3. Распределение тепловых потоков преобразователя с различной шириной коллектора ($B = 10, 25, 40$ мм) поперек щелевого отверстия

Fig. 3. Distribution of heat flows of the transformer with different collector width ($B = 10, 25, 40$ mm) transverse the slot opening

Рис. 4. Поперечное распределение тепловых потоков преобразователей с шириной коллектора $B = 10$ мм, расположенного симметрично (а) и несимметрично (б) относительно щелевого отверстия

Fig. 4. Transverse distribution of heat flows of the transformer with collector width $B = 10$ mm, located symmetrically (a) and non-symmetrically (б) relating to the slot opening

После определения оптимальной ширины коллектора ($B = 10$ мм) была проведена следующая серия экспериментов с использованием несимметричного коллектора (см. рис. 4, б, рис. 5). При этом производилась обработка образцов из стали 60Г как в прямом ($V_{пр}$), так и в обратном ($V_{обр}$) направлении. Несимметричное расположение коллектора позволяет получить другой тер-

мический цикл обработки по сравнению с симметричным. Обработка преобразователем с несимметрично расположенным коллектором в прямом направлении (см. рис. 5) позволяет осуществить плавный подогрев в начале цикла, переход к резкому нагреву и последующему охлаждению обрабатываемой поверхности. Обработка в обратном направлении способствует резкому нагреву в начале цикла и дальнейшему плавному подогреву, который определяет меньшую скорость охлаждения поверхностного слоя изделия, что в конечном счете отражается на его структуре и свойствах.

Рис. 5. Схема обработки заготовки при прямом ($V_{пр}$) и обратном ($V_{обр}$) движении несимметричного преобразователя:
1 — преобразователь; 2 — охлаждающий канал; 3 — поток плазмы; 4 — обрабатываемая заготовка; 5 — щель газового канала; 6 — газовый коллектор

Fig. 5. Diagram of the detail treatment at direct ($V_{пр}$) and reverse ($V_{обр}$) moving of non-symmetrical transformer:
1 — transformer; 2 — cooling channel; 3 — plasma flow; 4 — the treated detail; 5 — the slot of gas channel; 6 — gas collector

Номера режимов обработки в прямом и обратном направлениях с параметрами представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. РЕЖИМЫ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

TABLE 1. PLASMA TREATMENT REGIMES

Номер режима	V, мм/мин	N, кВт	G, г/с
1	200	25	1,6
2	300	28	1,6
3	400	32	1,6
4	500	35	1,6

При металлографическом исследовании упрочненного слоя образцов, обработанных по исследованным режимам, выявлено несколько основных типов микроструктуры. Имеются общие

тенденции изменения микроструктуры по глубине слоя. За исключением режимов обработки № 1 и 2 в обратном направлении для всех исследованных режимов в поверхностных слоях присутствует низкоотпущенный пакетный мартенсит ($600 \text{ HV}_{0,981}$), который плавно переходит в промежуточный слой с неоднородной микроструктурой, состоящей из участков троостомар-

тенсита ($430 \text{ HV}_{0,981}$). Еще глубже наблюдаются промежуточная микроструктура троостосорбита ($330 \text{ HV}_{0,981}$) и основной металл из сорбита отпуса с расположенными по границам зерен участками феррита ($305 \text{ HV}_{0,981}$). Режимы упрочнения оказали влияние на глубину слоев, различающихся структурным состоянием (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. МИКРОСТРУКТУРА ПЛАЗМЕННО-УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ, МАКСИМАЛЬНАЯ ГЛУБИНА ЗТВ И МИКРОТВЕРДОСТЬ НА ГЛУБИНЕ 0,05 мм ПРИ ОБРАБОТКЕ В ПРЯМОМ И ОБРАТНОМ НАПРАВЛЕНИЯХ

TABLE 2. MICROSTRUCTURE OF PLASMA-HARDENED LAYER, HAZ MAXIMUM DEPTH AND MICRONHARDNESS AT THE DEPTH OF 0.05 mm AFTER TREATMENT IN DIRECT AND RETURN DIRECTIONS

Режим обработки	Направление обработки	Глубина, мм			Микротвердость на глубине 0,05 мм
		низкоотпущенный мартенсит ($600 \text{ HV}_{0,981}$)	троостомартенсит ($430 \text{ HV}_{0,981}$)	максимальная глубина ЗТВ	
Без упрочнения	—	—	—	—	305
1	Прямое	1,1	1,25	1,4	1200
	Обратное	—	1,2	1,4	473
2	Прямое	1,1	1,25	1,4	1100
	Обратное	—	1,1	1,3	539
3	Прямое	1,1	1,2	1,25	760
	Обратное	0,9	1,1	1,2	660
4	Прямое	1,03	1,07	1,15	750
	Обратное	0,9	1	1,1	670

Важной эксплуатационной характеристикой упрочненного слоя является износостойкость в условиях сухого трения, которую определяли на трибологическом комплексе ТК-1 [9]. В качестве измерительных средств использовали многооборотный индикатор типа 1 МИГ ГОСТ 9696 и инфракрасный датчик перемещений. Контртелом служил диск из сплава ВК-8 диам. 22 мм и толщиной 2 мм, закрепленный на оси синхронного электродвигателя. Частота вращения диска — 600 с^{-1} , нагрузка на ось диска — 25 Н. В табл. 3 представлены результаты испытаний на износостойкость в условиях сухого трения при истирании паза в образце глубиной 0,5 мм.

ТАБЛИЦА 3. ПУТЬ ТРЕНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРЕНИЯ ПРИ ИСТИРАНИИ ОБРАЗЦА ДО ГЛУБИНЫ 0,5 мм

TABLE 3. FRICTION WAY AT WEAR RESISTANCE TESTS UNDER DRY FRICTION CONDITIONS AFTER SAMPLE ABRASION DOWN TO 0.5 mm DEPTH

Направление обработки	Номер режима			
	1	2	3	4
Прямое	7780	7580	5925	5730
Обратное	6300	6050	6030	5880
Основной металл	5650			

В условиях сухого трения при истирании до глубины 0,5 мм при обработке в прямом направлении для всех режимов испытания на износостойкость проводили в области со структурой низкоотпущенного пакетного мартенсита. Значения износостойкости коррелируют со значениями микротвердости. Режим № 1 обеспечил максимальное значение микротвердости вблизи поверхности — 1200 HV, что соответствует структуре свежезакаленного мартенсита. Именно этот режим показал наиболее высокий уровень износостойкости — путь трения 7780 м. Достаточно близкие значения твердости и износостойкости обеспечил режим № 2 — 1100 HV и 7580 м соответственно. Именно эти режимы характеризуются минимальными скоростью перемещения (200–300 мм/мин) и мощностью (25–28 кВт) плазмотрона.

Образцы, обработанные по режимам № 3 и 4, характеризующимся максимальными скоростью перемещения (400–500 мм/мин) и мощностью (32–35 кВт) плазмотрона, существенно уступают по уровню микротвердости на поверхности (760 и 750 HV соответственно) режимам № 1 и 2. Значения износостойкости у данных образцов ниже примерно на 25 %, чем у образцов, обработанных по режимам № 1 и 2. Минимальное значение износостойкости получено для режима № 4. Скорость перемещения плазмотрона оказывает существенное влияние на явление самоот-

пуска мартенсита. При режимах № 3 и 4 в поверхностных слоях присутствует низкоотпущенный мартенсит (150–200 °С) с более низким уровнем твердости.

В условиях сухого трения при истирании до глубины 0,5 м образцов, обработанных в обратном направлении на всех исследованных режимах, получен пониженный уровень твердости по сравнению с обработкой в прямом направлении.

Особенно заметное падение твердости отмечено на образцах, обработанных по режимам № 1 и 2, в которых получена неоднородная структура троостомартенсита с пониженным уровнем твердости (466–580 HV). Для этих двух режимов при достаточно близких значениях твердости получен практически одинаковый уровень износостойкости (6050–6300 м). Следовательно, низкая скорость перемещения плазмотрона при обратном перемещении привела к самоотпуску закаленной структуры. А образцы № 3 и 4, которые при обработке в прямом направлении имели структуру низкоотпущенного мартен-

сита, сохранили данный тип структуры при значениях твердости на поверхности 610–660 HV. Износостойкость для режимов при обратном направлении обработки близка к значениям, полученным при обработке в прямом направлении, и составляет 6030 м для режима № 3 и 5880 м для режима № 4, что незначительно превышает уровень износостойкости для неупрочненного металла — 5650 м.

Износостойкость при испытаниях на истирание полужакопленным абразивом определяли на лабораторной установке [10]. Схема установки представляет собой видоизмененную классическую схему Бринелля, в отличие от которой обеспечивается постоянство условий изнашивания ввиду отсутствия дробления абразивных частиц металлическим роликом.

Проведены испытания на износостойкость упрочненного слоя образцов, обработанных по разным режимам. Результаты испытаний представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНОСА ПРИ ИСТИРАНИИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПУТИ ТРЕНИЯ 95 м, 10^{-4} г/м

TABLE 4. WEAR INTENSITY DURING SURFACE ABRASION AT FRICTION WAY OF 95 m, 10^{-4} g/m

Номер режима			1	2	3	4
На поверхности						
Упрочненный металл	Направление обработки	Прямое	1,7	1,4	1,1	1,1
		Обратное	2,2	1,7	1,5	1,3
На глубине 0,5 мм от поверхности						
Упрочненный металл	Направление обработки	Прямое	1,4	1,4	1,4	1,6
		Обратное	2,6	2,3	2,0	2,0
Основной металл			3,15			

Испытания на истирание полужакопленным абразивом показали, что существует тенденция повышения износостойкости поверхности как при прямом, так и при обратном перемещении плазмотрона с увеличением мощности и скорости перемещения плазмотрона. Особенно четко эта закономерность проявляется для обратного направления, где для режима № 1 износостойкость составляет $2,2 \times 10^{-4}$ г/м, а для режима № 4 — $1,3 \times 10^{-4}$ г/м. При прямом направлении обработки износостойкость на поверхности выше на 20–25 %, чем в обратном направлении.

Упрочнение как в прямом, так и в обратном направлении дает существенный прирост изно-

состойкости — до 3 раз по сравнению с неупрочненным металлом.

Износостойкость на глубине 0,5 мм при прямом направлении обработки практически не зависит от режима обработки и сохраняется на высоком уровне [$(1,4–1,6) \times 10^{-4}$ г/м].

При обработке в обратном направлении для всех режимов отмечено ухудшение износостойкости [$(2,0–2,6) \times 10^{-4}$ г/м] по сравнению с обработкой в прямом направлении, что, вероятно, обусловлено неоднородной микроструктурой троостосорбита.

Выводы

1. Изменение конфигурации выходного канала устройства для плазменной поверхностной обработки наряду с технологическими параметрами режима (скорость перемещения плазмотрона, мощность плазмотрона и расход плазмообразующего газа) позволяет эффективно

управлять термическим циклом, обеспечивающим формирование требуемых свойств поверхности обрабатываемого изделия.

2. В условиях сухого трения при истирании до глубины 0,5 мм значения износостойкости коррелируют со значениями микротвердости. Об-

работка в прямом направлении по режимам № 1 и 2 с минимальной мощностью и скоростью перемещения плазмотрона обеспечивает максимальную износостойкость и микротвердость вблизи поверхности при структуре свежезакаленного мартенсита. Повышение мощности и скорости перемещения плазмотрона при режимах № 3 и 4 приводит к самоотпуску мартенсита, снижению как твердости поверхности до 760 и 750 HV, так и износостойкости на 25 %. При обработке в обратном направлении для всех исследованных режимов получен пониженный уровень твердости и износостойкости по сравнению с обработкой в прямом направлении. Для режимов № 1 и 2 это обусловлено структурой троо-

стомартенсита, образовавшейся в результате самоотпуска.

3. Испытания на истирание полузакрепленным абразивом показали, что плазменная обработка поверхности дает существенный прирост износостойкости — до 3 раз по сравнению с неупрочненным металлом. Установлена тенденция повышения износостойкости поверхности на 20–25 % как при прямом, так и при обратном перемещении плазмотрона с увеличением мощности и скорости перемещения плазмотрона. При обработке в обратном направлении для всех режимов отмечено ухудшение износостойкости по сравнению с обработкой в прямом направлении, что, вероятно, обусловлено неоднородной структурой троостосорбита.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антиповский С.В., Тюфтяев А.С. Технология плазменного упрочнения гребней колесных пар // Сварочное производство. 2009. № 6. С. 45–48.
2. Желобцова Г.А., Ильичев М.В., Исакаев Э.Х. и др. Влияние плазменного упрочнения на ресурс металлургического оборудования // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2006. № 3. С. 51, 52.
3. Исакаев М.-Э.Х., Ильичев М.В., Филиппов Г.А. Особенности структурообразования и формирования свойств при плазменной обработке углеродистой стали // Материаловедение. 2003. № 2. С. 52–55.
4. Прокопенко А.К., Беляев В.И., Голубев А.П. и др. Перспективные методы повышения срока службы деталей оборудования и инструмента на предприятиях легкой промышленности и сферы обслуживания // Сервис в России и за рубежом. 2014. № 1 (48). С. 113–122.
5. Апкин А.Н., Воронин И.В., Пенькова Г.И., Мордынский В.Б. Исследование теплофизических и трибологических свойств фрикционных материалов для тормозных колодок // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2015. № 6. С. 48–50.
6. Пат. 2152445 РФ, МПК С 21 D 9/34, В 23 К 10/00. Устройство для плазменной обработки / М.-Э.Х. Исакаев, А.Э. Яблонский, А.С. Тюфтяев // Заявл. 04.03.1999. Оpubл. 10.07.2000. Бюл. № 19.
7. Пат. 2530192 РФ, МПК С 23 С 8/24, С 23 С 14/48. Способ плазменного азотирования деталей / А.С. Тюфтяев, М.В. Ильичев, Г.А. Филиппов, К.Л. Косырев, О.В. Ливанова // Заявл. 28.03.2013. Оpubл. 10.10.2014. Бюл. № 28.
8. Тюфтяев А.С., Мордынский В.Б., Ильичев М.В., Коновалов П.А. Экспериментальные исследования устройства для плазменной поверхностной обработки материалов // Физика и химия обработки материалов. 2017. № 2. С. 29–33.
9. Тюфтяев А.С., Мордынский В.Б., Желобцов Е.А. Оценка износостойкости высокоуглеродистых сталей в условиях сухого трения и абразивного изнашивания // Сталь. 2015. № 10. С. 55–60.
10. Мордынский В.Б., Тюфтяев А.С., Терешкин С.А. и др. Исследование влияния модифицирующей обработки рабочих поверхностей на трибологические характеристики при абразивном изнашивании // Справочник. Инженерный журнал. 2016. № 2. С. 6–12.

Поступила 1 октября 2018 г.

REFERENCES

1. Antipovskii S.V., Tyuftayev A.S. Technology of plasma strengthening of wheel flanges. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2009, no. 6, pp. 45–48. (In Russ.).
2. Zhelobtsova G.A., Il'ichev M.V., Isakaev E.Kh., Sinel'nikov V.A., Tyuftayev A.S., Filippov G.A. Influence of plasma strengthening on metallurgical equipment resource. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2006, no. 3, pp. 51, 52. (In Russ.).
3. Isakaev M.-E.Kh., Il'ichev M.V., Filippov G.A. Particularities of structure formation and formation of properties during plasma treatment of carbon steel. *Materialovedenie*, 2003, no. 2, pp. 52–55. (In Russ.).
4. Prokopenko A.K., Belyaev V.I., Golubev A.P. etc. Perspective methods of service life increasing of details of equipment and instrument at light industry plants and in service sector. *Servis v Rossii i za rubezhom*, 2014, no. 1 (48), pp. 113–122. (In Russ.).
5. Apkin A.N., Voronin I.V., Pen'kova G.I., Mordynskii V.B. Study of thermal, physical and tribological properties of friction materials for break shoes. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2015, no. 6, pp. 48–50. (In Russ.).

6. Isakaev M.-E.Kh., Yablonskii A.E., Tyufyaev A.S. *Ustroistvo dlya plazmennoi obrabotki* [A facility for plasma treatment]. Patent RF no. 2152445. IPC C 21 D 9/34, B 23 K 10/00. *Byulleten' izobretenii*, 2000, no. 19. (In Russ.).
7. Tyufyaev A.S., Il'ichev M.V., Filippov G.A., Kosyrev K.L., Livanova O.V. *Sposob plazmennogo azotirovaniya detalei* [A method of plasma nitride hardening of details]. Patent RF no. 2530192. IPC C 23 C 8/24, C 23 C 14/48. *Byulleten' izobretenii*, 2014, no. 28. (In Russ.).
8. Tyufyaev A.S., Mordynskii V.B., Il'ichev M.V., Konovalov P.A. Experimental study of a facility for plasma surface treatment of materials. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2017, no. 2, pp. 29–33. (In Russ.).
9. Tyufyaev A.S., Mordynskii V.B., Zhelobtsov E.A. Estimation of wear resistance of high carbon steels under dry friction and abrasive wear conditions. *Stal'*, 2015, no. 10, pp. 55–60. (In Russ.).
10. Mordynskii V.B., Tyufyaev A.S., Tereshkin S.A. etc. Study of influence of working surface modifying treatment on tribology characteristics during abrasive wear: a reference book. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*, 2016, no. 2, pp. 6–12. (In Russ.).

Received October 1, 2018