



УДК 621.643; 621.785.53

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-4-83-90>

Научная статья

Research article



Модифицирование поверхности сталей, применяемых в арматуростроении

И. С. Соколова^{1, 2}, А. В. Оборин², С. Е. Порозова¹¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29

²ООО «Ионные технологии»

Россия, 617064, г. Краснокамск, Шоссейная ул., 47А, корп. 5

✉ seporozova@pstu.ru

Аннотация. Запорно-регулирующая аппаратура является важной частью системы транспортировки жидкости и газов, поэтому ее бесперебойная работа зависит от качества и свойств поверхности деталей. Один из способов улучшения ее свойств – это ионное азотирование, которое активно применяется в России, Израиле, Болгарии, Беларуси, Австрии и других странах. Этот метод прост в управлении и контроле, универсален для всех видов сталей и сплавов, экологически безопасен, обеспечивает размерную и чистовую точность, повышает эксплуатационные свойства деталей. В настоящей работе приведены обобщенные результаты исследований формирования модифицированных слоев на сталях, применяемых в арматуростроении. Стали марок 20X13, 07X16H6, 14X17H2, 12X18H10T упрочняли методом ионного азотирования. Впервые представлены сравнительные данные, получаемые на оборудовании разных производителей. В ходе работы проведены комплекс металлографических исследований, дюрOMETРИЧЕСКИЙ анализ, а также рассмотрено распределение твердости по глубине модифицированного слоя. Установлено, что на сталях с содержанием более 12 % Cr образуется четко выраженный диффузионный слой, который выявляется темным цветом после травления 4 %-ным раствором азотной кислоты. Однако общая глубина слоя, которая оценивается по распределению микротвердости в глубь детали, больше на 20–40 %, чем выявляется по микроструктуре. Микротвердость поверхности после ионно-плазменного азотирования увеличилась в 5 раз на стали 07X16H6. Таким образом, упрочнение с использованием этого метода деталей запорно-регулирующей арматуры решит проблему быстрого износа поверхности. За счет ее модифицирования можно повысить эксплуатационные свойства деталей и обеспечить бесперебойную работу трубопроводной системы.

Ключевые слова: ионно-плазменное азотирование (ИПА), сталь, 20X13, 07X16H6, 14X17H2, 12X18H10T, модифицированный слой, нитридная зона, болгарское оборудование, российское оборудование, запорно-регулирующая аппаратура (ЗРА)

Для цитирования: Соколова И.С., Оборин А.В., Порозова С.Е. Модифицирование поверхности сталей, применяемых в арматуростроении. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2024;18(4):83–90.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-4-83-90>

Surface modification of steels used in valve manufacturing

I. S. Sokolova^{1, 2}, A. V. Oborin², S. E. Porozova¹¹Perm National Research Polytechnic University

29 Komsomolskiy Prosp., Perm 614990, Russia

²Ion Technologies LLC

47A Bld. 5 Shosseynaya Str., Krasnokamsk 617064, Russia

✉ seporozova@pstu.ru

Abstract. Shut-off and control valves are essential components in liquid and gas transportation systems; therefore, their reliable operation depends on the quality and properties of their surface parts. One method to enhance these properties is ion nitriding, which is actively

used in Russia, Israel, Bulgaria, Belarus, Austria, and other countries. This method is easy to manage and control, is universal for all types of steels and alloys, is environmentally safe, ensures dimensional and surface finish accuracy, and improves the operational properties of parts. This paper presents summarized results of studies on the formation of modified layers on steels used in valve manufacturing. The steels of grades AISI 420, AISI 301, AISI 431, and AISI 321 were strengthened by ion nitriding. For the first time, comparative data obtained on equipment from different manufacturers are presented. A comprehensive metallographic analysis, durometric analysis, and hardness distribution assessment across the depth of the modified layer were conducted during the study. It was found that steels with more than 12 % Cr form a clearly defined diffusion layer, which appears dark after etching with a 4 % nitric acid solution. However, the overall depth of the layer, as assessed by the distribution of microhardness into the depth of the part, is 20–40 % greater than revealed by the microstructure. The surface microhardness after ion-plasma nitriding increased fivefold in the AISI 301 steel. Thus, strengthening parts of shut-off and control valves using this method addresses the issue of rapid surface wear. By modifying the surface, the operational properties of parts can be enhanced, ensuring the uninterrupted operation of the pipeline system.

Keywords: ion-plasma nitriding (IPN), steel, AISI 420, AISI 301, AISI 431, AISI 321, modified layer, nitride zone, Bulgarian equipment, Russian equipment, shut-off and control valves

For citation: Sokolova I.S., Oborin A.V., Porozova S.E. Surface modification of steels used in valve manufacturing. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2024;18(4):83–90. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-4-83-90>

Введение

Во многих отраслях промышленности от качества труб и особенно запорно-регулирующей аппаратуры (ЗРА) зависит не только бесперебойная транспортировка жидкости и газов, но и в целом безаварийная работа производств [1–4]. Существенно повысить эксплуатационные характеристики изделий из металлов и сплавов позволяют защитные покрытия на поверхности, получаемые методами ионной химико-термической обработки (ИХТО), одним из наиболее перспективных вариантов которой является ионное азотирование [5–9]. В литературе встречаются несколько наименований данного процесса: ионно-вакуумное, ионно-плазменное и ионное азотирование [10–13]. Этот универсальный способ модифицирования поверхности в плазме тлеющего разряда в вакууме [14–16] достаточно простой в применении, позволяет упрочнять все виды сталей и сплавов и относится к процессам так называемой белой металлургии [17].

Инженеры израильской компании «HABONIM» одними из первых начали применять низкотемпературную обработку ионно-плазменным азотированием (ИПА) для повышения износостойкости деталей арматуростроения [18]. В настоящее время технология низкотемпературной карбонитрации в плазме шаровых кранов прописана во всех каталогах израильского производителя [19].

На сегодняшний день одними из признанных лидеров в сфере ионного азотирования являются австрийцы. Они разработали и запатентовали такие технологии как PLASNIT, PLASOX, PLAPOL, которые используют, в том числе, для упрочнения деталей арматуростроения [20].

Несмотря на то, что в России работы по изучению процесса ИХТО ведутся с 1970-х годов, активное использование ионного азотирования в промышленности началось относительно недавно [21–24].

Производить оборудование в России начали также намного позже, чем в других странах, но на сегодняшний день уже существуют отечественные установки для ИПА. Автоматизированное программное обеспечение, основанное на технологических разработках по принципу ноу-хау, использование микропроцессорной и высокоточной техники, а также технологий высокоскоростной передачи больших объемов информации и модульных роботизированных систем позволяют конкурировать с зарубежными аналогами [21].

На 2020 г. в структуре потребления промышленной ЗРА в России доля импорта составляла 53 % [3]. В 2023 г. по-прежнему необходимо импортировать недостающие товарные позиции [25], поэтому отечественные предприятия самостоятельно осваивают новые виды продукции и ведут поиск новых технологий для повышения надежности и качества продукции арматуростроения. В связи с этим сравнение результатов, получаемых на установках разных производителей, а также проведение исследований и обобщение данных по упрочнению сталей методом ИХТО в настоящее время являются актуальными задачами.

Цель настоящей работы – изучить модифицированные слои, полученные ионно-плазменным азотированием, на сталях, применяемых в арматуростроении, и сравнить данные, получаемые на установках болгарского и российского производств.

Методика исследований

Процесс ионно-плазменного азотирования проводили на установках от компаний «IONITECH» (Болгария) и ООО «Ионные технологии» (Россия). Температура режимов ИПА составляла 550–580 °С, давление – 4 мбар, смесь газов была состава 25 % N₂ + 75 % H₂. Время изотермической выдержки (5–12 ч) обусловлено тем, что для исследования были выбраны 4 различные марки стали. Для одинаковых

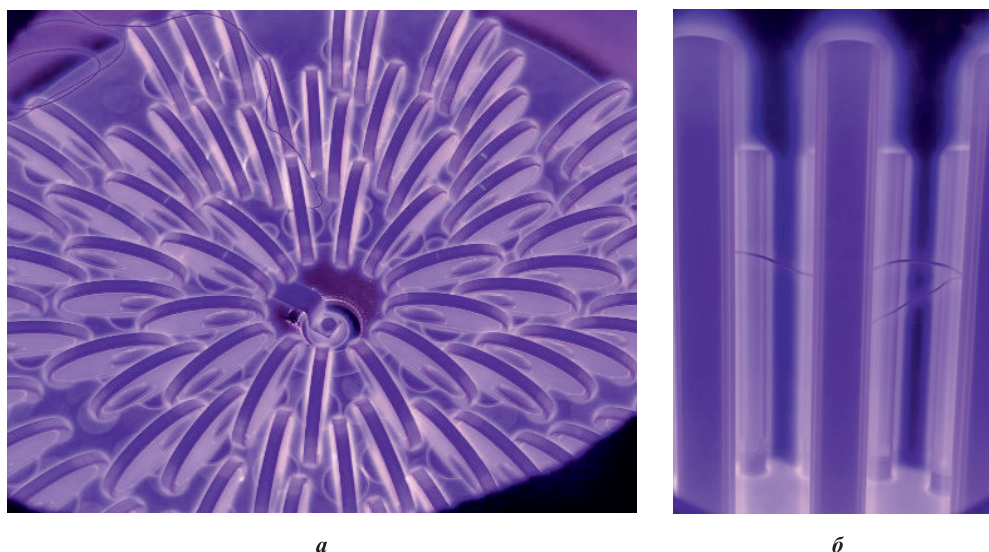


Рис. 1. Вид деталей «шибер» (а) и «шток» (б) в плазме во время процесса упрочнения
Fig. 1. View of parts “gate” (a) and “stem” (b) in plasma during the strengthening process

образцов длительность выдержки на обеих установках была одинаковой. На рис. 1 приведены снимки деталей в процессе азотирования.

Исследования проводили на сталях марок 14X17H2, 20X13, 07X16H6 и 12X18H10T, которые используются для изготовления деталей ЗРА, таких как шибер, седло, шток, сепаратор, поршень, шпиндель, клин и др. Общие характеристики сталей приведены в табл. 1. Для разрушающего контроля вместе с деталями в рабочую камеру помещали образцы-свидетели.

После ИПА проводили визуальный контроль качества всей поверхности образцов на наличие внешних дефектов. Азотированную поверхность проверяли на равномерность цвета, отсутствие шелушения и сколов, особенно вдоль острых кромок, при увеличении в 15–30 раз. Хрупкость азотированного слоя контролировали по виду отпечатка алмазной пирамиды в соответствии со шкалой хрупкости ВИАМ (СТО ИНТИ S.70.2-2022).

Одним из ключевых показателей упрочнения является поверхностная твердость – это значение

Таблица 1. Общие характеристики исследованных сталей¹
Table 1. General characteristics of the investigated steels¹

Марка	Состав стали, %	Структура	Применение ЗРА
20X13	0,16–0,25 C 12–14 Cr До 0,6 Ni Остальное – Fe	Мартенситная	В условиях атмосферной коррозии и слабоагрессивных сред
07X16H6	0,05–0,09 C 15,5–17,5 Cr 5–8 Ni Остальное – Fe	Аустенитно-мартенситная	В атмосферных условиях, солевых средах, для криогенной техники
14X17H2	0,11–0,17 C 16–18 Cr 1,5–2,5 Ni 0,2 Ti Остальное – Fe	Мартенситно-ферритная	В слабоагрессивных средах при требовании повышенных прочности и твердости
12X18H10T	До 0,12 C 17–19 Cr 9–11 Ni 0,4–1,0 Ti Остальное – Fe	Аустенитная	Для сварных узлов арматуры, работающих в агрессивных средах

¹ГОСТ 33260-2015, ГОСТ 5632-14.

твердости тонкого модифицированного слоя, поэтому важно подобрать нагрузку так, чтобы при вдавливания индентора в поверхностный слой не было его продавливания (СТО ИНТИ S.70.2-2022). Подготовка к измерению этого показателя заключалась в осветлении поверхности шлифовальной бумагой P2500, после чего поверхностную твердость слоя опреде-

ляли по методу Виккерса согласно ГОСТ 2999-75 под действием нагрузки 49,03 Н. Микротвердость поверхности [26] оценивали при нагрузке 0,98 Н согласно ГОСТ 9450-76 на приборе ПМТ-3 (Россия).

Образцы для анализа микроструктуры запрессовывали в бакелитный порошок и по стандартной методике изготавливали шлифы (СТО ИНТИ S.70.2-2022).

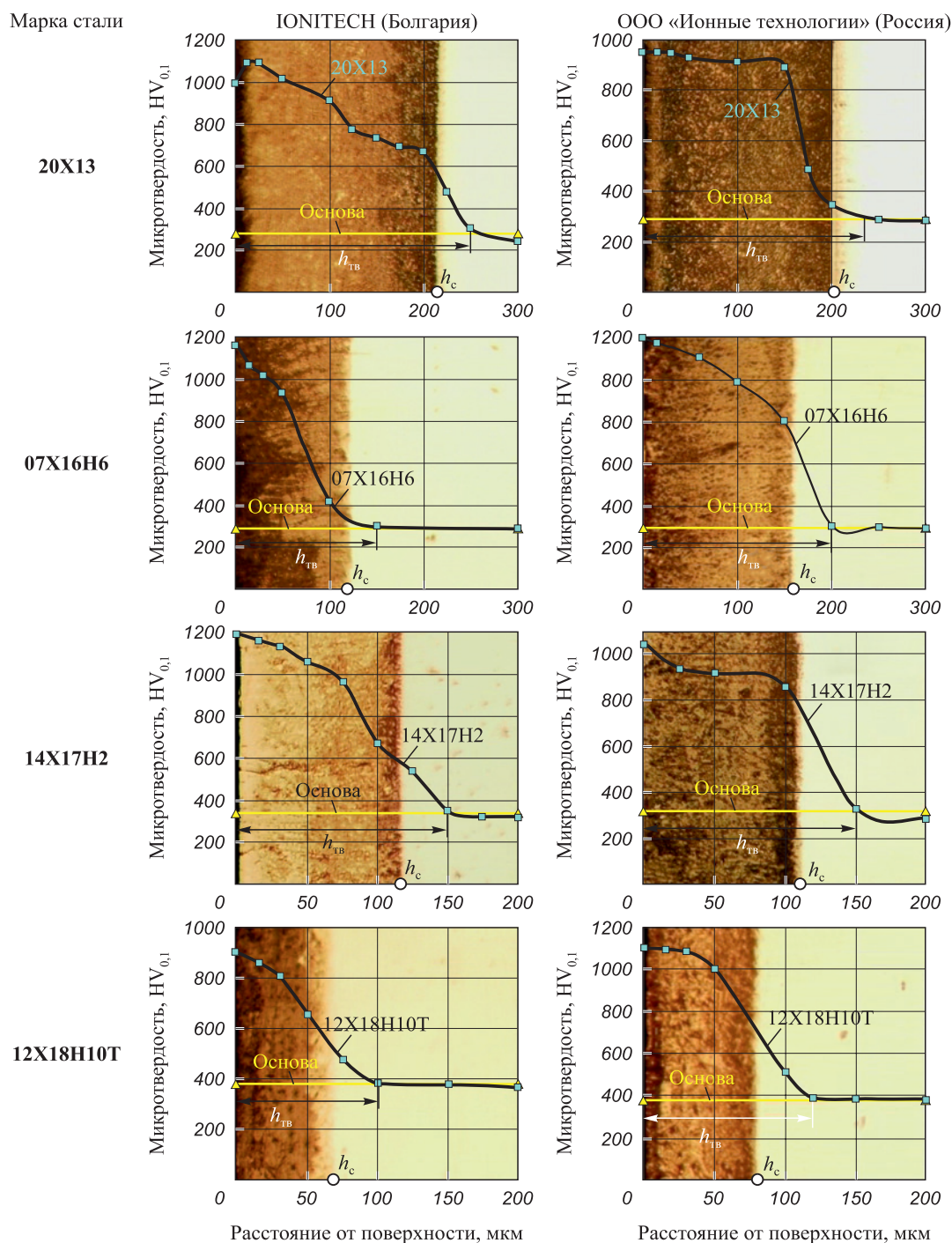


Рис. 2. Микроструктуры и графики распределения микротвердости по глубине азотированного слоя на сталях различного состава
 h_c – глубина слоев по микроструктуре, h_{TB} – по распределению микротвердости

Fig. 2. Microstructures and microhardness distribution graphs by depth of nitrided layer on steels of different compositions
 h_s – depth of layers by microstructure, h_h – by microhardness distribution

Таблица 2. Поверхностные твердость и микротвердость азотированных слоев исследуемых сталей

Table 2. Surface hardness and microhardness of nitride layers on the investigated steels

Марка стали	«IONITECH» (Болгария)			ООО «Ионные технологии» (Россия)		
	Исходная твердость HV _{0,1}	HV ₅	HV _{0,1}	Исходная твердость HV _{0,1}	HV ₅	HV _{0,1}
20X13	260–280	840–930	980–1005	280–300	1000–1050	1080–1100
07X16H6	260–290	1070–1145	1145–1200	250–280	1080–1130	1165–1235
14X17H2	320–340	900–1050	1085–1105	250–300	970–1030	1010–1060
12X18H10T	340–380	840–930	990–1150	380–400	950–1000	1100–1145

Микроструктурное исследование проводили на микроскопе БиОптик (Россия) при использовании универсального травителя (4 %-ной азотной кислоты) для выявления азотированного слоя. Согласно нормативам его общая глубина ($h_{\text{тв}}$) определяется по результатам измерения микротвердости от поверхности в нормальном к ней направлении до точки, в которой микротвердость соответствует значению микротвердости сердцевины. Глубину слоя контролировали дюрометрическим методом на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,98 Н с выдержкой 10 с (СТО ИНТИ S.70.2-2022).

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования азотированных слоев на сталях различного состава (см. табл. 1), полученных на ионно-плазменных установках болгарского и отечественного производств, представлены на рис. 2.

В результате ИПА на деталях сформирован равномерно развитый нехрупкий азотированный слой. Визуальный контроль показал, что детали и образцы имеют равномерный матово-серый цвет без внешних дефектов поверхности. Исследования шлифов сталей с содержанием Cr более 12 % выявило легко подвергающуюся травлению модифицированную зону с четкими границами. Глубина азотированных слоев по микроструктуре достигает $h_c = 0,08 \div 0,22$ мм (рис. 3), а по распределению микротвердости $h_{\text{тв}} = 0,10 \div 0,25$ мм. Во всех случаях глубина $h_{\text{тв}}$ азотированного слоя, полученного на отечественной установке, больше.

Для сталей мартенситной и мартенситно-ферритной структур (см. табл. 1) можно отметить минимальные различия глубины азотированного слоя по микроструктуре и микротвердости у слоев, полученных в обоих случаях (рис. 3), хотя результаты с использованием отечественной установки выше. При азотировании поверхности аустенитно-мартенситной и аустенитной сталей (см. табл. 1) различия глубины азотированных слоев существенны (рис. 3), т.е. часть азотированного слоя (переходная зона) не выявляется при травлении использованными реакти-

вами. Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что метод определения глубины азотированного слоя по микротвердости является более информативным и корректным.

В табл. 2 приведены результаты измерения поверхностных твердости и микротвердости азотированных слоев, являющихся основными критериями износостойкости поверхности запорно-регулирующей арматуры.

Модифицирование поверхности металла привело к увеличению твердости поверхности всех исследуемых сталей. В процессе диффузионного насыщения поверхности азотом происходило образование нитридов железа и легирующих элементов, что обуславливает повышенную твердость азотированного слоя. Максимальный результат наблюдается на стали 07X16H6: микротвердость ее поверхности увеличилась в 5 раз с ~ 260 HV_{0,1} до ~ 1200 HV_{0,1}.

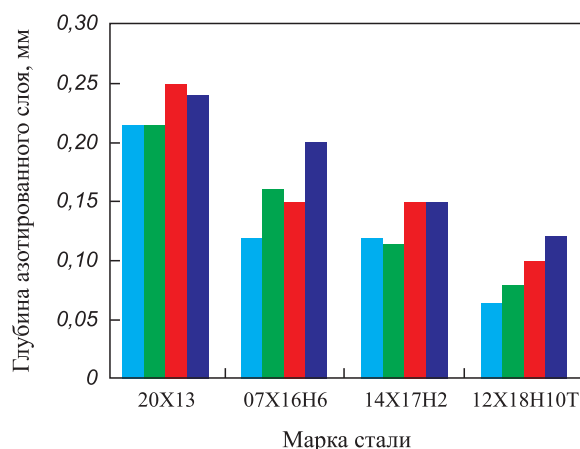


Рис. 3. Гистограмма распределения глубины азотированных слоев по микроструктуре (h_c) и микротвердости ($h_{\text{тв}}$)

и — результаты, полученные на установке производства IONITECH (Болгария);
и — ООО «Ионные технологии» (Россия)

Fig. 3. Histogram of the depth distribution of nitride layers by microstructure (h_s) and microhardness (h_h)

and — results obtained on equipment from IONITECH (Bulgaria);
and — results obtained on equipment from Ion Technologies LLC (Russia)

Минимальные показатели повышения микротвердости (в 2,8 раза) отмечены на стали 12Х18Н10Т.

Таким образом, технология поверхностного упрочнения позволила сохранить размерную и чистовую точность деталей [27]. Три наиболее крупных российских производителя ЗРА [3] уже используют ионное азотирование для повышения качества своей продукции и внедряют его в производственный цикл [28].

Заключение

Широко применяемые в арматуростроительной области стали 20Х13, 07Х16Н6, 14Х17Н2 и 12Х18Н10Т после ионно-плазменного азотирования в условиях проведенных исследований показывают увеличение поверхностной твердости в 2,8–5,0 раз.

Метод оценки глубины азотированного слоя по микротвердости является более корректным, чем определение по микроструктуре, так как при азотировании поверхности аустенитно-мартенситной и аустенитной сталей (см. табл. 1, рис. 3) часть этого слоя (переходная зона) не выявляется при травлении.

В результате сравнительного анализа микротвердости модифицированных слоев установлено, что российское оборудование, произведенное компанией ООО «Ионные технологии», при одинаковых режимах работы не уступает зарубежному и демонстрирует сопоставимые результаты упрочнения поверхности деталей с известным на мировом рынке оборудованием компании «IONITECH» (Болгария).

Список литературы / References

1. Афанасьева О.В., Коркунов С.Б., Тер-Матеосянц И.Т. Тенденции развития российского рынка трубопроводной арматуры в 2015 г. В условиях санкций и контрсанкций. *Территория Нефтегаз*. 2016;(6):96–99. Afanas'eva O.V., Korkunov S.B., Ter-Mateosyants I.T. Trends in the development of the Russian market of pipeline valves in 2015. Under the conditions of sanctions and counter-sanctions. *Territoriya Neftegaz*. 2016;6:96–99. (In Russ.).
2. Колотырин Е.А. Импортзамещение в российском арматуростроении. *Интернет-журнал «Наукоедение»*. 2016;8(3):1–17. <https://doi.org/10.15862/40EVN316> Kolotyryin E.A. Imports substitution in the Russian valve industry. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*. 2016;8(3):1–17. (In Russ.). <https://doi.org/10.15862/40EVN316>
3. Рынок запорно-регулирующей арматуры в период кризиса 2020 года. *Промышленник Сибири: отраслевой журнал*. URL: <https://prom-siberia.ru/analytics/analiz-rynka-zapornoj-armatury-v-usloviyah-krizisa-2020-goda/> (дата обращения: 02.03.2023). The market of shut-off and control valves during the crisis of 2020. *Promyshlennik Sibiri: otraslevoj zhurnal*. URL: <https://prom-siberia.ru/analytics/analiz-rynka-zapornoj-armatury-v-usloviyah-krizisa-2020-goda/> (date of access: 03/02/2023). (In Russ.).
4. Казанцев М.Н., Флегентов И.А., Петелин А.Н. Пути повышения надежности запорной арматуры для магистральных трубопроводов (на примере задвижек шибберных). *Нефтегазовое дело. Транспортировка, хранение нефти и газа*. 2016;14(4):75–81. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2016-4-75-81> Kazantsev M.N., Flegentov I.A., Petelin A.N. Ways to improve the reliability of shut-off valves for trunk pipelines (on the example of gate valves). *Neftegazovoe delo. Transportirovka, hranenie nefiti i gaza*. 2016;14(4):75–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2016-4-75-81>
5. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов. М.: МГТУ им. Баумана, 2014. 520 с.
6. Bhadraiah D., Nouveau C., Ram Mohan Rao K. Plasma nitriding of CrMoV steel for the enhancement of hardness and corrosion resistance. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2021;75(2):371–380. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02423-2ff>
7. Landgraf P., Bergelt T., Rymer L.-M., Kipp C., Grund T., Bräuer G., Lampke T. Evolution of microstructure and hardness of the nitrided zone during plasma nitriding of high-alloy tool steel. *Metals*. 2022;12(5):866. <https://doi.org/10.3390/met12050866>
8. Ram Mohan Rao K., Nouveau C., Khanna A.S., Karanveer S. Aneja, Trinadh K. Plasma nitriding of 90CrMoV8 tool steel for the enhancement of corrosion resistance. *Materials Today: Proceedings*. 2020;24(2):1006–1010. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.413>
9. Carrivain O., Hugon R., Marcos G., Noel C., Skiba O., Czerwicz T. Inspection of contamination in nitrogen plasmas by monitoring the temporal evolution of the UV bands of NO-γ and of the fourth positive system of N₂. *Journal of Applied Physics*. 2021;130(17):173304. <https://doi.org/10.1063/5.0064704>
10. Pye D. Practical nitriding and ferritic nitrocarburizing. ASM International, 2003. 256 p. https://doi.org/10.1361/pnfn2003_FM
11. Ram Mohan Rao K., Trinadh K., Nouveau C. Glow discharge plasma nitriding of low alloy steel. *Materials Today: Proceedings*. 2019;19:864–866. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.224>
12. Chemkhi M., Retraint D., Roos A., Garnier C., Waltz L., Demangel C., Proust G. The effect of surface mechanical attrition treatment on low temperature plasma nitriding of an austenitic stainless steel. *Surface & Coatings Technology*. 2013;221:191–195. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2013.01.047>
13. Trinadh K., Nouveau C., Ram Mohan Rao K. Effects of plasma nitriding on low alloy Cr–Mo–V steel. *Materials Today: Proceedings*. 2021;40(1):79–82. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.720>
14. Cabeça M.C.S., Rodrigues S.F., Neto A.S., de Miranda-junior E.J.P., Reis G.S., de Oliveira A.M. Comparative study on plasma nitriding in cathodic cage with conventional Nitriding of the austenitic stainless steel 316. *International Journal of Current Research*. 2017;9(01):44666–44672.

15. Okan Unal, Erfan Maleki, Remzi Varol. Effect of severe shot peening and ultra-low temperature plasma nitriding on Ti–6Al–4V alloy. *Vacuum*. 2018;150:69–78. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.01.027>
16. Forati Rad H., Amadeh A., Moradi H. Wear assessment of plasma nitrided AISI H11 steel. *Materials & Design*. 2011;32(5):2635–2643. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.01.027>
17. Тазетдинов В.И. «Белая металлургия» как инструмент повышения эффективности инновационного развития трубного производства. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2011;(12):52–55.
Tazetdinov V.I. “White metallurgy” as a tool for improving the efficiency of innovative development of pipe production. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2011;(12):52–55. (In Russ.).
18. Ramon J., Botstein O., Jaccod G. Плазменное азотирование нержавеющей стали 316L при низкой температуре значительно повышает износостойкость арматуры: *Материалы 6-й Международной выставки и конференции «Valve World 2008»* (г. Маастрихт, 4–6 ноября 2008 г.). *Арматуростроение*. 2010.67(4):27–28.
19. Habonim product catalog. Ball valves with metal seats. 2017. No. 48. URL: www.habonim.com (accessed: 13.02.2023).
20. RUBIG Driving Success [Electronic resource]. URL: <http://www.rubig.com> (accessed: 13.02.2023).
21. Оборин А.В., Богданов В.В. Прогрессивная технология упрочнения ответственных изделий нефтегазовой отрасли. Краткая история. Настоящий момент. Перспективы. *Нефть. Газ. Металлообработка*. 2018;67(7):48–50.
Oborin A.V., Bogdanov V.V. Progressive technology of hardening of critical products of the oil and gas industry. A brief history. The present moment. The prospects. *Neft'. Gaz. Metalloobrabotka*. 2018;67(7):48–50. (In Russ.).
22. Каченюк М.Н., Носков А.В., Патрушев В.С. Исследование влияния различных режимов ионного азотирования на формирование поверхностного упрочненного слоя быстрорежущей стали Р6М5. *Молодой ученый*. 2016;23(127):50–54. URL: <https://moluch.ru/archive/127/35139/> (дата обращения: 21.08.2023).
- Kachenyuk M.N., Noskov A.V., Patrushev V.S. Investigation of the influence of various modes of ion nitriding on the formation of a surface hardened layer of high-speed steel R6M5. *Molodoj uchenyj*. 2016;23(127):50–54. URL: <https://moluch.ru/archive/127/35139/> (accessed: 21.08.2023). (In Russ.).
23. Спивак Л.В., Щепина Н.Е., Богданов В.В., Оборин А.В., Солдаткин Л.Н. Калориметрия фазовых превращений азотированного слоя в нитраллоях. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2021;18(2):210–215. <https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2021.02.009>
Spivak L.V., Shchepina N.E., Bogdanov V.V., Oborin A.V., Soldatkin L.N. Calorimetry of phase transformations of the nitrided layer in nitralloy. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2021;18(2):210–215. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2021.02.009>
24. Газизов А.З., Думлер Е.Б., Сарачева Д.А. Метод повышения прочностных свойств элементов запорной арматуры. В сб.: *Роль математики в становлении специалиста: Материалы международной научно-практической конференции* (г. Уфа, 18 мая 2021 г.). Уфа: УГНТУ, 2021. С. 105–110.
25. Мориц М. Импорт под санкциями: белый, серый, параллельный. *Медиагруппа ARM-TORG*. 22.02.2023. URL: <https://armtorg.ru/news/46145/> (дата обращения: 02.03.2023).
Moritz M. Sanctioned Imports: white, grey, parallel. *ARM-TORG Media Group*. 02.22.2023. URL: <https://armtorg.ru/news/46145/> (accessed: 03.02.2023). (In Russ.).
26. Sommer M., Ebner G., Decho H., Hoja S., Fichte-Heinen R. Surface preparation for characterization of nitride compound layers using hardness indentation and the Palmqvist method. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;24(3):7974–7988. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.041>
27. Босьяков М.Н., Силина О.В., Козлов А.А. Плазменная химико-термическая обработка. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2023. 135 с.
28. Внедренное оборудование. URL: https://www.procion.ru/vnedrenie_tehnologii_xto/vnedrennoe_oborudovanie/ (дата обращения: 05.04.2023).

Сведения об авторах



Information about the Authors

Ирина Сергеевна Соколова – аспирант кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» (МКМК), Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), зав. лабораторией ООО «Ионные технологии»

ORCID: 0009-0004-2603-1785

E-mail: sokolova@procion.ru

Алексей Владимирович Оборин – директор ООО «Ионные технологии»

E-mail: oborin@procion.ru

Светлана Евгеньевна Порозова – д.т.н., профессор кафедры МКМК, ПНИПУ

ORCID: 0000-0001-5835-9727

E-mail: seporozova@pstu.ru

Irina S. Sokolova – Postgraduate student at the Department of “Mechanics of Composite Materials and Structures” (MCMS), Perm National Research Polytechnic University (PNRPU), Head of Laboratory at Ion Technologies LLC

ORCID: 0009-0004-2603-1785

E-mail: sokolova@procion.ru

Aleksei V. Oborin – Director of Ion Technologies LLC

E-mail: oborin@procion.ru

Svetlana E. Porozova – Dr. Sci. (Eng.), Professor at the Department of MCMS, PNRPU

ORCID: 0000-0001-5835-9727

E-mail: seporozova@pstu.ru

Вклад авторов



Contribution of the Authors

И. С. Соколова – проведение металлографических исследований, обобщение полученных данных, написание текста статьи.

А. В. Оборин – подготовка и проведение процессов ионного азотирования, корректировка текста статьи.

С. Е. Порозова – научное руководство, обработка полученных результатов, подготовка и корректировка текста статьи к публикации.

I. S. Sokolova – conducted metallographic studies, summarized the obtained data, and wrote the article.

A. V. Oborin – prepared and conducted ion nitriding processes, and revised the article text.

S. E. Porozova – provided scientific supervision, processed the obtained results, and prepared and revised the article text for publication.

Статья поступила 22.08.2023 г.

Доработана 20.11.2023 г.

Принята к публикации 27.11.2023 г.

Received 22.08.2023

Revised 20.11.2023

Accepted 27.11.2023