

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-363-378

PROSPECTS OF USING GAS OXYCARBONITRIDING AT RESTORATION OF COMPONENTS OF SHIP TECHNICAL MEANS

N. V. Bogdanova¹, A. A. Kuz'min¹, A. A. Shnurenko²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — Joint Stock Company Kanonersky Shiprepairing Yard,
St. Petersburg, Russian Federation

Studies aimed at developing alternative solid chrome recovery methods and surface hardening of ship technical means. The use of traditional methods of galvanic coatings requires scarce metals and high energy costs. All technological processes of galvanic accompanied by formation of highly toxic waste. Therefore, relevant is the search for alternative, environmentally sound, cost-effective methods of restoration and protection details. As the research object were selected samples of the cylindrical form, steel 10 GOST 1050-89 imitating parts of marine engineering (diesel fuel pump plunger, piston pins, valves) and automotive parts (brake cylinder piston). In the work conducted comparative research of metrological and metallographic characteristics, corrosion resistance and durability of prototypes (after gas karbonitriding and oxidation) and control after chromium. Determine the effect of temperature and duration of oxidation to the corrosion test specimens. Found that the samples after the gas karbonitriding and oxidation in the air atmosphere with 350 °C for 6:00 have maximum corrosion resistance in 6 – 10 times faster than resistance monitoring (chrome) samples. As a result, bench tests found that the samples after gas nitriding and oxidizing complies with the established requirements for durability and are not inferior to the control-chrome. Developed alternative solid chrome surface hardening technology details — oksikarbonitriding technology, including mechanical processing, preheating the air atmosphere and exposure for 60 min at temperature of 350 °C to 400 °C; short-term gas karbonitriding in an atmosphere of ammonia and ekzogaz when their ratio of 1:1 to 1:4 at 600 – 630 °C with cooling in oil or ekzogaz; polishing to a specified size; oxidation in air atmosphere at a temperature in the range from 300 °C to 400 °C for a period of up to 6:00. Oksikarbonitriding technology developed after proper adaptation can be used in the manufacture of parts of marine engineering instead of traditional hard chromium plating.

Keywords: electroplating, parts of marine engineering, gas karbonitridin, oxidation, corrosion resistance, durability, technology.

For citation:

Bogdanova, Natal'ya V., Aleksandr A. Kuz'min, and Anatolii A. Shnurenko. "Prospects of using gas oxy-carbonitriding at restoration of components of ship technical means." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.2 (2018): 10.21821/2309-5180-2018-10-2-363-378.

УДК: 669-63

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗОВОГО ОКСИКАРБОНИТРИРОВАНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Н. В. Богданова¹, А. А. Кузьмин¹, А. А. Шнуренко²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ЗАО «Канонерский судоремонтный завод»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проведены исследования, направленные на разработку альтернативного твердому хромированию способа поверхностного восстановления и упрочнения деталей судовых технических средств. Использование традиционных методов гальванических покрытий требует применения дефицитных металлов и больших энергетических затрат. Все технологические гальванические процессы сопровождаются образованием высокотоксичных отходов. Поэтому актуальными являются поиски альтернативных, эколо-

гически чистых, экономически эффективных методов восстановления и защиты деталей судостроения. В качестве объекта исследований были выбраны образцы цилиндрической формы из Стали 10 ГОСТ 1050-89, имитирующие детали судового машиностроения (плунжер топливного насоса СДВС, поршневые пальцы, клапаны) и детали автопрома (поршень тормозного цилиндра). В работе проведены сравнительные исследования метрологических и металлографических характеристик коррозионной стойкости и долговечности опытных образцов (после газового карбонитрирования и оксидирования) и контрольных (после хромирования). Определено влияние температуры и длительности оксидирования на коррозионную стойкость образцов. Установлено, что опытные образцы после газового карбонитрирования и оксидирования в воздушной среде при 350 °С обладают максимальной коррозионной стойкостью, в 6 – 10 раз превосходящей стойкость контрольных (хромированных) образцов. В результате стендовых испытаний установлено, что опытные образцы после газового азотирования и оксидирования соответствуют установленным требованиям по долговечности и не уступают контрольным — хромированным. Разработана альтернативная твердому хромированию технология поверхностного упрочнения деталей — технология оксикарбонитрирования, включающая механическую обработку, предварительный нагрев в воздушной атмосфере и выдержку в течение 60 мин при температуре от 350 до 400 °С, кратковременное газовое карбонитрирование в атмосфере аммиака и экзогаза в соотношении 1:1 ... 1:4 при 600 – 630 °С с охлаждением в масле или экзогазе, полирование в заданный размер, оксидирование в воздушной среде при температуре в диапазоне от 300 °С до 400 °С продолжительностью до 6 ч. Разработанная технология оксикарбонитрирования после соответствующей адаптации может быть использована при изготовлении деталей судового машиностроения вместо традиционного твердого хромирования.

Ключевые слова: гальванические покрытия, детали судового машиностроения, газовое карбонитрирование, оксидирование, коррозионная стойкость, долговечность, технология.

Для цитирования:

Богданова Н. В. Перспективы использования газового оксикарбонитрирования при восстановлении деталей судовых технических средств / Н. В. Богданова, А. А. Кузьмин, А. А. Шнуренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 10.21821/2309-5180-2018-10-2-363-378.

Введение (Introduction)

В судовом машиностроении многих стран для восстановления и упрочнения деталей судовых технических средств (СТС) находит применение большое количество методов сварки и наплавки, напыления, нанесения гальванических покрытий и т. д. Судоремонтные фирмы и предприятия для восстановления одних и тех же деталей нередко применяют различные технологии. Выбор метода и технологии восстановления часто обусловлен степенью освоенности метода, опытом, накопленным предприятием, а также наличием необходимого оборудования. Восстановление изношенных деталей для их повторного использования является одним из основных путей совершенствования технической эксплуатации флота на базе общегосударственной стратегии ускоренного внедрения малоотходных и ресурсосберегающих технологий.

Наряду с быстрыми темпами развития новых направлений восстановления деталей и нанесения покрытий продолжают совершенствоваться и известные технологии, в том числе гальванических покрытий. Для повышения коррозионной и износостойкости металлических деталей применяются различные гальванические процессы: никелирование, хромирование, кадмирование, цинкование и др. Гальванические покрытия используются при восстановлении таких ответственных деталей СДВС, как стальные и чугунные коленчатые валы, фундаментные блоки и рамы, втулки и поршни рабочих цилиндров, поршневые пальцы, клапаны, шатуны, плунжерные пары и т. д. [1] – [3]. Так, например, приобретать новые коленчатые валы взамен изношенных экономически нецелесообразно из-за их высокой стоимости.

Восстановление и упрочнение изношенных поверхностей коленчатых валов возможно нанесением гальванических покрытий — при износе до 0,5 мм хромированием, при износе свыше 0,5 мм никелированием с последующим хромированием толщиной 0,2 – 0,3 мм. Коленчатые валы судовых дизелей всех марок восстанавливаются фирмами LTC, Van der Horst Holland, DMA по одобренной Ллойдом технологии, включающей хромирование шеек коленчатых валов длиной до 8 м. В большинстве случаев чугуны и стали, применяемые для изготовления втулок цилиндров,

не обеспечивают их требуемой надежности, поэтому для уменьшения изнашивания рабочей поверхности ее иногда покрывают пористым хромом толщиной до 0,4 мм или подвергают лазерной закалке. Наружные поверхности втулок, омываемые водой, для повышения их коррозионной и кавитационной стойкости можно также хромировать или покрывать полимерными материалами.

Однако использование традиционных методов гальванических покрытий, таких как хромирование, цинкование, химическое никелирование и т. д. требует применения дефицитных металлов и высоких энергетических затрат. Все технологические процессы сопровождаются образованием высокотоксичных отходов. Это существенно ухудшает экологию производства и требует значительных затрат для повышения безопасности работы персонала и утилизации отходов. Так, например, отходы при использовании технологии твердого хромирования содержат особо вредные вещества для окружающей среды. Поэтому актуальным является поиск альтернативных, экологически чистых, экономически эффективных методов восстановления и защиты деталей СТС.

Газовое азотирование является экономичной и безопасной для окружающей среды технологией по сравнению с технологией твердого хромирования, так как позволяет сократить время процесса и затраты на него. Возможна обработка деталей практически любого размера и формы. Газовое азотирование является альтернативным вариантом имеющейся технологии твердого хромирования. Причиной для применения химико-термической обработки (ХТО) в аммиачных средах как метода защиты от коррозии служит появление низкотемпературного карбонитрирования и оксикарбонитрирования. Приведенные в ряде работ [4] – [6] результаты исследований подтверждают такую возможность. Известен разработанный фирмой «Айхелин» процесс кратковременного газового азотирования под названием «Нитрок», при котором азотирование осуществляют при 570 – 575 °С в смеси аммиака и неочищенного экзогаза при их соотношении 1 : 1 или 1 : 2 [7]. Недостатком этой технологии является тот факт, что полученные слои непригодны для эксплуатации в коррозионной среде.

В последние годы XX в. исследователями различных стран было установлено положительное влияние поверхностных оксидных слоев на износостойкость и коррозионную стойкость азотированных (карбонитрированных) деталей [8] – [10]. Сложные упрочненные слои, состоящие из зоны внутреннего азотирования, нитридного (карбонитридного) слоя и поверхностного оксидного слоя, получают обычно диффузионным насыщением в нитрирующей (карбонитрирующей) среде с последующей выдержкой изделий в окислительной среде [11] – [13]. Недостатком таких технологий является длительность процесса (до 70 ч) и необходимость использования сложного дорогостоящего оборудования для ионных процессов нитрирования и оксидирования. Сложность представляет также и сам процесс насыщения, требующий периодического изменения давления насыщающей среды. Присутствует возможность быстрого выхода из строя внутренних элементов ионного оборудования при подаче в камеру насыщения (для последующего оксидирования) водяного пара и т. д.

Известна технология ХТО стальных деталей [14] – [16], в соответствии с которой производят нагрев и выдержку деталей при 350 – 400 °С в течение 10 – 30 мин в воздушной атмосфере, далее азотирование в атмосфере аммиака и экзогаза при их соотношении 1 : 4 при 570 – 590 °С, оксидирование в экзогазе в этом же рабочем пространстве и при той же температуре без подачи аммиака в течение 1 – 2 ч и охлаждение в масле. Способ позволяет увеличить износостойкость и коррозионную стойкость деталей, а также использовать для его реализации стандартное оборудование для химико-термической обработки в условиях индивидуального и мелкосерийного производства.

Недостатками способа являются невысокая коррозионная стойкость полученных изделий, возможность возникновения деформаций деталей при охлаждении в масле, ограничение использования технологии в крупносерийном производстве на проходном оборудовании без изменения его конструкции (строительства дополнительной камеры охлаждения в экзогазе).

Настоящее исследование проведено с целью разработки альтернативного твердому хромированию технологического процесса поверхностного упрочнения деталей СТС. В качестве объекта исследований были выбраны образцы цилиндрической формы, имитирующие детали судо-

вого машиностроения (плунжер топливного насоса СДВС, поршневые пальцы, клапаны) и автопрома (поршень тормозного цилиндра). Учитывая особенности эксплуатации деталей, связанные с трением и коррозионным воздействием, необходимо найти способ поверхностной обработки, повышающий коррозионную стойкость и износостойкость одновременно. В аналитических источниках не найдены конкретные данные об оптимальном методе поверхностной обработки деталей, отвечающем заданным требованиям, а также о влиянии различных видов поверхностной обработки на их геометрические размеры, влиянии температуры и длительности окисления на коррозионную стойкость поверхностных слоев и др.

Поэтому в работе была выполнена проверка возможности использования процесса оксикарбонитрирования, состоящего из газового карбонитрирования и окисления, для поверхностного упрочнения деталей. В процессе исследования определяли влияние параметров процесса на геометрические характеристики образцов, влияние среды охлаждения после азотирования (масло, экзогаз), температуры и времени окисления на металлографические характеристики, фазовый состав, коррозионную стойкость и долговечность.

Задачами исследования являлись повышение коррозионной стойкости изделий, снижение деформации деталей, повышение размерной точности, возможность использования предлагаемой технологии вместо твердого хромирования, снижение трудоемкости и улучшение условия труда.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве материала образцов использовалась Сталь 10 ГОСТ 1050-89. Маркировку в виде цифр наносили на донную часть поверхности образца. Исследование проводили в следующих направлениях:

- изготовление опытных партий образцов по технологии: газовое карбонитрирование и окисление при различных значениях температуры (350 °С, 550 °С и 580 °С) и времени выдержки (от 1 до 6 ч);
- исследование влияния температуры и времени окисления азотированных образцов на их геометрические характеристики и коррозионную стойкость;
- проведение сравнительных стендовых испытаний на долговечность;
- исследование влияния операции предварительного (перед окислением) полирования азотированных образцов на их геометрические характеристики;
- разработка технологии оксикарбонитрирования для поверхностного упрочнения деталей.

Исследование геометрических параметров, коррозионной стойкости и долговечности образцов проводили в сравнении с деталями, обработанными по базовому режиму (хромирование) на современном отечественном и зарубежном оборудовании. Кратковременное газовое карбонитрирование¹ образцов всех вариантов обработки проводили в проходных печах фирмы «Айхелин» с предварительным подогревом в воздушной среде до 350 °С и переносом в нагретую от 610 °С до 620 °С печь с атмосферой из аммиака и экзогаза с соотношением 1 : 1 – 1 : 4, далее с охлаждением в масле или экзогазе. Контроль расхода технологических газов при азотировании осуществлялся с помощью ротаметров. Режим газового карбонитрирования опытной партии приведен в табл. 1.

Таблица 1

Режим газового карбонитрирования опытных образцов

Подача технологических газов, м ³ /ч			Температура зон печи, °С		Время выдержки в зонах печи, ч		Состав экзогаза и атмосферы печи, %				Температура масла, °С
Зона	Аммиак	Экзогаз	Зона	Температура	Зона	Время	Объект контроля	CO ₂	CO	H ₂	
1	2,7	6,5	1	610	1	2,5	Экзогаз	9,2	1,9	1,73	70
2	2,5	9,5	2	615	2	2,5	1-я зона печи	2,8	4,52	20,1	
							2-я зона печи	3,2	4,58	19,5	

¹ Далее будет также использоваться термин «газовое азотирование» как более распространенный, фактически проводится процесс газового карбонитрирования, т. е. совместного насыщения поверхности деталей азотом и углеродом в смеси аммиака и экзогаза.

Окончательное шлифование цилиндрической поверхности хромированных деталей проводили на бесцентровом шлифовальном станке «Джустина» до размера наружного диаметра $d = 48,07_{0,01}$ мм. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовали 2-х и 3 %-й водный раствор «Олинола». Полирование цилиндрической поверхности хромированных (после шлифования) и азотированных (после азотирования) до размера наружного диаметра $d = 48 + 0,074 + 0,036$ осуществлялось на полировальном станке фирмы «Каннинг» (Германия).

После полирования опытные (азотированные) образцы подвергали оксидированию в воздушной среде в камерной печи при температуре от 350 °С, 550 °С и 580 °С в течение от одного до шести часов. Измерения наружного диаметра до и после азотирования и после оксидирования проводили с помощью скобы рычажной повышенной точности с ценой деления 0,001 мм.

Коррозионную стойкость деталей оценивали по ГОСТ 9.308-85, согласно методу испытания при воздействии нейтрального соляного тумана. При этом о коррозионной стойкости судили по времени появления первых очагов коррозии и площади поражения коррозией после испытаний по прошествии определенного периода времени.

Для исследования структуры и толщин поверхностных слоев применяли *метод металлографического анализа*, при котором определяли толщины оксидного, карбонитридного слоев, диффузионного слоя (зоны внутреннего азотирования), микроструктуру карбонитридного и диффузионного слоев. Подготовка образцов для проведения металлографического анализа, а именно: вырезка темплета, заливка темплета в пластмассу, подготовка поверхности шлифов, осуществлялась на оборудовании фирмы «Струерс» (Дания). Травление поверхности шлифов проводили в 4 %-м спиртовом растворе азотной кислоты. Микроструктуру слоев фиксировали с помощью микроскопа модели «Polyvar» фирмы «Reichert – JUNG» (Австрия) при увеличении 300 – 500х.

Толщины оксидного, карбонитридного слоев, слоя азотистого мартенсита и диффузионных зон (по травимости) измеряли под микроскопом с помощью линейки-окуляра при увеличении 500х. Твердость карбонитридного и оксидного слоев определяли с помощью твердомера фирмы «Кнуп» с нагрузкой 0,2 кг. Исследование распределения твердости по толщине зоны внутреннего азотирования (ЗВА) осуществлялось на поперечном не травленном шлифе с помощью твердомера фирмы «Карл Франк» (Германия).

Рентгеноструктурный анализ фазового состава поверхностных слоев на наличие фаз Fe_3N , Fe_2N , Fe_4N , альфа-твердого раствора азота в железе, а также окислов железа проводили с помощью дифрактомера «Дрон-1,5».

Стеновые испытания опытных образцов проводились в приведенной последовательности:

- проверка соответствия геометрических параметров;
- проверка на долговечность.

Определение соответствия геометрических размеров и шероховатости осуществлялось по ГОСТ 2.789-73 и ГОСТ 2.309-73 с помощью профилометра-профилографа фирмы «Taylor-Hobson» и «Талисфер-6». До и после стеновых испытаний проводились коррозионные испытания в камере соляного тумана по ГОСТ 9.3.08-85 и металлографический анализ толщины карбонитридного слоя по указанным ранее методикам.

Результаты (Results)

В результате проведенного исследования были получены следующие результаты:

– металлографического исследования образцов после различных видов ХТО и оксидирования приведены в табл. 2 и 3, а также на рис. 1;

– метрологических и коррозионных испытаний (время появления первых очагов коррозии), образцов, обработанных по опытным режимам (азотирование и оксидирование с различной температурой оксидирования) в сравнении с базовым режимом (хромирование), представлены в табл. 4;

– коррозионных испытаний (время появления первых очагов коррозии) образцов, обработанных по опытным режимам с различным временем оксидирования в сравнении с образцами, подвергшимися хромированию, приведены в табл. 5;

– коррозионных испытаний (динамика поражения коррозией боковой и донной поверхностей) опытных (после газового азотирования и оксидирования в воздушной среде при 350 °С в течение шести часов) и контрольных (хромированных) образцов представлены в табл. 6 и на рис. 2.

Таблица 2

Результаты измерений толщин и твердости диффузионных слоев образцов после опытных режимов оксикарбонитрирования

Режим оксикарбонитрирования	Толщина			Твердость			
	оксидного слоя, мкм	карбонитридного слоя, мкм	зоны внутреннего азотирования, мм	оксидного слоя (максимальная), $HV_{0,01}$	карбонитридного слоя, $HV_{0,025}$	ЗВА (максимальная), HV_1	сердцевины, HV_1
ГА + О (350 °С)	4,5	30	0,3	300	700 – 1000	339	135
	3,0 – 4,0	30	0,4	135	800 – 1400	257	123
ГА + О (550 °С)	3,0 – 4,0	30	0,3	125	700 – 900	339	132
	3,0 – 4,0	25	0,35	135	970 – 1100	260	119
ГА + О (580 °С)	4,0	28	0,25	145	800 – 850	330	123

Таблица 3

Распределение твердости по толщине диффузионных слоев, микроструктура карбонитридного и диффузионного слоев

Вид термообработки	Номер образца	Распределение твердости HV_1 по толщине диффузионного слоя	Микроструктура	
			карбонитридного слоя	диффузионного слоя и ЗВА
ГА + О (350 °С)	7	339-313-305-269-263-219-210 (через 0,05 мм)	Азотист мартенсит 8 мкм, далее ярко выраженное реечное строение	Сохранена текстура, нитридные образования в виде весьма тонких игл и карбонитридов глобулярной формы строчечной ориентации
	12	257-214-205-186-175-178 (через 0,1 мм)	Азотистый мартенсит 10 мкм, далее столбчатое строение с перпендикулярной ориентацией к поверхности	Наличие текстуры, выделение из твердого раствора нитридов в виде тонких и мелких игл, карбонитриды
ГА + О (550 °С)	13	339-330-283-276-257-257-245-219 (через 0,05 мм)	Азотистый мартенсит 8 мкм столбчатого характера	Сохранена текстура, нитридные образования в виде весьма тонких игл и карбонитридов глобулярной формы строчечной ориентации
	18	260-234-214-214-205-205-169 (через 0,05 мм)	Азотистый мартенсит 10 мкм, далее столбчатого строения	Наличие текстуры, выделение из твердого раствора нитридов в виде тонких длинных игл, длина которых уменьшается по мере удаления от поверхности, карбиды
ГА + О (580 °С)	22	330-321-313-283-251-239-214 (через 0,05 мм)	Азотистый мартенсит 8 мкм, далее столбчатого строения	Наличие текстуры в приповерхностной зоне, выделение из твердого раствора азотистой фазы в виде игл, по границе зерен — карбиды

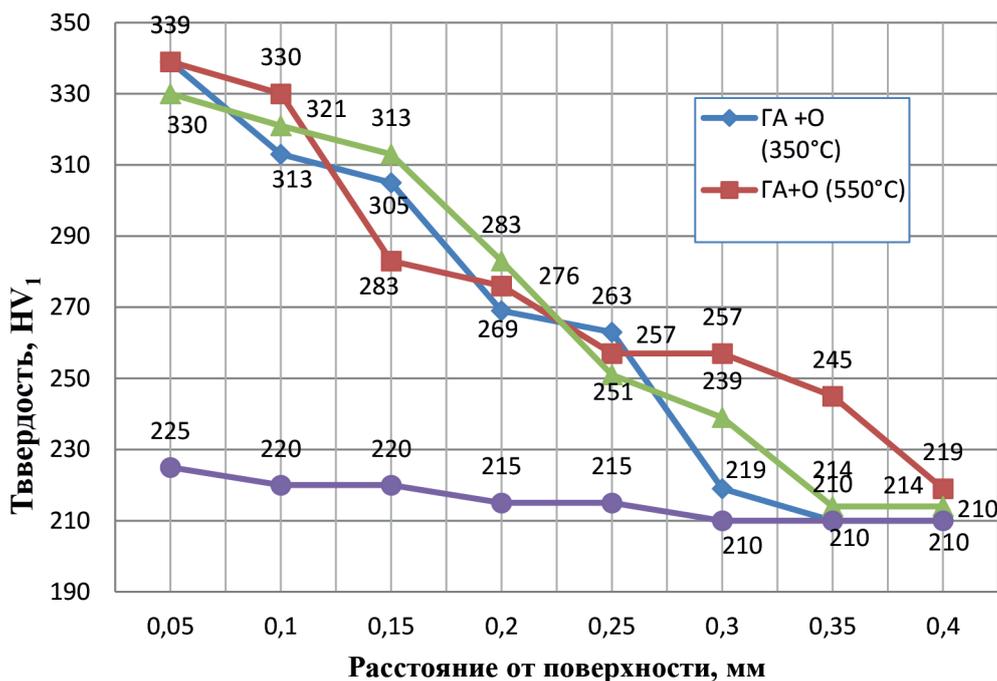


Рис. 1. Распределение твердости по толщине диффузионных слоев опытных (газовое азотирование и оксидирование) и контрольных (хромирование) образцов
Условные обозначения: ГА + О (350 °С), ГА + О (550 °С), ГА + О (580 °С) — соответственно газовое азотирование и оксидирование при температуре 350 °С, 550 °С, 580 °С

Таблица 4

Влияние температуры оксидирования азотированных образцов на размер наружного диаметра и время появления первых очагов коррозии (время оксидирования — 3 ч)

Вид обработки	Размер наружного диаметра, мм			Изменения размера наружного диаметра, мкм	Время до появления первых очагов коррозии, ч			
	до азотирования	после азотирования	после оксидирования		дно	боковая часть	канавка	среднее
Хромирование	—	—	—	—	4	24	Не определено	14
ГА + О (350 °С)	48,034	48,071	48,07	0	165	217	180	187
ГА + О (550 °С)	48,033	48,07	48,075	5,4	52	165	93	103
ГА + О (580 °С)	48,034	48,071	48,077	6,3	34	105	171	103

Примечания: ГА — газовое азотирование; О — оксидирование.

Таблица 5

Влияние длительности оксидирования азотированных образцов при 350 °С на время появления первых очагов коррозии

Вид обработки	Время оксидирования, ч	Время до появления первых очагов коррозии, ч		
		на доньшке	на боковой поверхности	среднее значение
ГА + О (350 °С)	1	16,7	34,7	25,7
ГА + О (350 °С)	2	26,3	8	17,2
ГА + О (350 °С)	3	49	18,7	33,8
ГА + О (350 °С)	6	168	108	138
Хромирование		4	24	14

Таблица 6

Влияние опытной технологии (газовое азотирование и оксидирование при температуре 350 °С в течение шести часов) в сравнении с хромированием образцов на площадь поражения коррозией

Номер образца	Обработка	Площадь поражения коррозией в %, через период времени, ч					
		120		480		1128	
		Дно	Бок	Дно	Бок	Дно	Бок
8	Газовое азотирование и оксидирование (350 °С, 6 ч)	0	0	Следы	40	5	100
13		0	0	20	10	30	50
14		5	5	15	30	30	80
15		10	Следы	20	10	20	30
Среднее значение		3,8	1,2	13,8	22,5	21,2	65
2	Хромирование	100	100	100	100	100	100

На рис. 2 показаны поверхности образцов после 48-часовых испытаний в камере соляного тумана с различной предшествующей обработкой: твердое хромирование, оксикарбонитрирование с охлаждением после азотирования в масле, оксикарбонитрирование с охлаждением после азотирования в экзогазе.



Рис. 2. Поверхность образцов после 48-часовых испытаний в камере соляного тумана с предшествующей обработкой:

а — твердое хромирование; *б* — оксикарбонитрирование, охлаждение после азотирования в масле; *в* — оксикарбонитрирование, охлаждение после азотирования в экзогазе

Результаты металлографического и рентгеноструктурного анализов образцов после газового азотирования и оксидирования при 350 °С в течение шести часов, отобранных для стендовых испытаний на долговечность, приведены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты металлографического и рентгеноструктурного анализов образцов после газового азотирования и оксидирования при температуре 350 °С в течение шести часов, отобранных для стендовых испытаний на долговечность

Толщина оксидного слоя, мкм	Структура оксидного слоя	Толщина карбонитридного слоя, мкм	Структура карбонитридного слоя	Твердость компактной части слоя, $HV_{0,025}$	Толщина ЗВА*, мм	Фазовый состав	
						оксидной пленки	зоны соединений
1	Плотная	16 – 18	Компактный, столбчатого строения	700	0,3 – 0,36	Fe_3O_4	$\epsilon + \gamma^{1**}$

Примечания: * γ^1 — зона внутреннего азотирования; ** ϵ — карбонитрид Fe_3N ; γ^1 — Fe_4N карбонитрид.

Результаты измерений геометрических размеров опытных образцов, отобранных для стендовых испытаний на долговечность, приведены в табл. 8.

Таблица 8

Результаты измерений геометрических размеров образцов, отобранных для стендовых испытаний на долговечность

Номер детали	Диаметр	Длина	Шероховатость
	Требования к окончательно изготовленной детали		
	$48_{-0,028}^{-0,005} / 48_{+0,036}^{+0,074}$	$33 \pm 0,2 / 48,95 \pm 0,15$ мм	$Ra \leq 0,2 / Ra \leq 0,4$ мкм
1	48,05	49,11	0,24
2	47,99	33,24	0,3

Результаты коррозионных испытаний опытных (газовое азотирование плюс оксидирование при 350 °С в течение шести часов) и контрольных (хромирование) образцов в состоянии достендовых испытаний на долговечность и образцов, прошедших стендовые испытания, приведены в табл. 9.

Таблица 9

Результаты коррозионных испытаний опытных и контрольных образцов до стендовых испытаний на долговечность и образцов, прошедших стендовые испытания

Номер образца, вид обработки	Режим	Время до появления первых очагов коррозии, ч		Площадь поражения коррозией в % через 6 ч					
				120		480		1128	
		дно	боковая поверхность	дно	боковая часть	дно	боковая часть	дно	боковая часть
До стендовых испытаний									
№ 2 — хромирование	Контрольный	4	24	100	100	100	100	100	100
№ 8 — ГА+О	Опытный	480	144	0	0	Следы	40	5	100
№ 13 — ГА + О	Опытный	144	192	0	0	20	10	30	50
№ 14 — ГА + О	Опытный	24	72	5	5	15	30	30	80
№ 15 — ГА + О	Опытный	24	24	10	Следы	20	10	20	30
После стендовых испытаний									
№ 1 — хромирование	Контрольный	24	4	100	100	100	100	100	100
№ 7 — ГА+О	Опытный	24	48	5	50	10	90	50	100
№ 10 — ГА + О	Опытный	1128	24	0	20	0	50	Следы	100
№ 11 — ГА + О	Опытный	24	24	Следы	10	5	20	20	30

Примечание. А + О* — газовое азотирование плюс оксидирование (350 °С, 6 ч).

Результаты металлографического анализа хромированного образца (№ 1) и образца с опытным покрытием (№ 7) после стендовых и коррозионных испытаний приведены в табл. 10 и на рис. 3.

Результаты металлографического анализа опытных и контрольных (хромированных) образцов после стендовых испытаний на долговечность и испытаний коррозионной стойкости

Вид обработки	Состояние поверхности	Защитный слой			Диффузионный слой	Основа	
		толщина, мкм	твёрдость $H_{0,025}$	сплошность		твёрдость HV_1	микроструктура*
Хромирование	Покрыта продуктами коррозии	20	1300	Отсутствует**	-	197	Ф + ЗП
Азотирование и оксидирование	красно-бурого цвета	34 – 36	950	Сохранена***	0,25 мм (по травимости)	110	Ф + П+Ц

* Ф — феррит; ЗП — зернистый перлит; П — перлит; Ц — цементит.

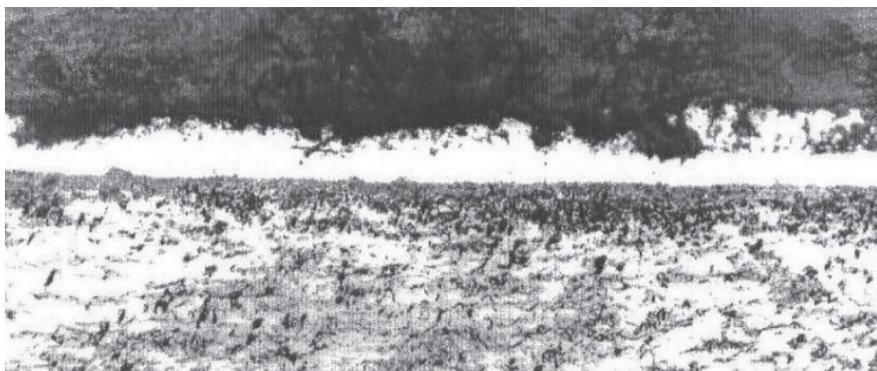
** В процессе испытаний на долговечность и коррозионную стойкость произошло нарушение сплошности хромового покрытия, разрушение поверхности образца с изменением рельефа и проникновение коррозионных язв внутрь металла.

*** В процессе испытаний на долговечность и коррозионную стойкость произошло разрушение поверхностной части карбонитридного слоя, в зоне максимального поражения коррозией сохранилась компактная часть слоя толщиной 4 мкм. Проникновение коррозии вглубь металла не выявлено.

а)



б)



в)

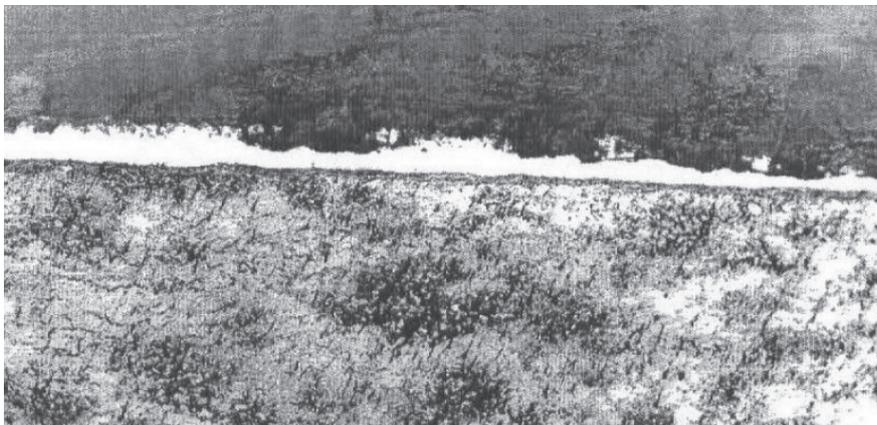


Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя образцов после стендовых испытаний на долговечность и испытаний коррозионной стойкости: а — контрольный образец (хромирование) после 120 ч коррозионных испытаний, 200х; б — опытный образец (газовое азотирование и оксидирование, 350 °С, 6 ч) после 1128 ч коррозионных испытаний, 320х; в — зона максимального поражения коррозией опытного образца после 1128 ч коррозионных испытаний, 200х

Результаты измерений наружного диаметра и шероховатости цилиндрической поверхности образцов до и после полирования и после оксидирования приведены в табл. 11 и на рис. 4.

Таблица 11

Результаты измерений наружного диаметра и шероховатости цилиндрической поверхности образцов до и после полирования*

Номер детали	Наружный диаметр, мм					Шероховатость Ra, мкм				
	До полирования	После полирования	Разность граф 2 и 3	После оксидирования	Разность граф 3 и 5	До полирования	После полирования	Разность граф 7 и 8	После оксидирования	Разность граф 8 и 10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	48,0613	48,0575	0,00375	48,056	0,0015	0,516	0,168	0,348	0,127	0,041
5	48,070	48,0613	0,00875	48,06	0,0012	0,924	0,192	0,732	0,168	0,024
6	48,0663	48,060	0,00625	48,049	0,0012	0,656	0,176	0,48	0,1254	0,051
9	48,0713	48,0663	0,005	48,0663	0,0	0,746	0,188	0,558	0,1678	0,002
16	48,0625	48,0575	0,005	48,0575	0,0	0,514	0,128	0,386	0,1058	0,022
17	48,0638	48,0588	0,005	48,0588	0,0	0,54	0,142	0,398	0,1394	0,026
18	48,0638	48,0563	0,0075	48,0575	0,0012	0,482	0,18	0,302	0,1542	0,026
19	48,0626	48,0563	0,00625	48,0563	0,0	0,64	0,172	0,468	0,1602	0,012

Примечание. В таблице приведены средние значения результатов, состоящих из четырех измерений.

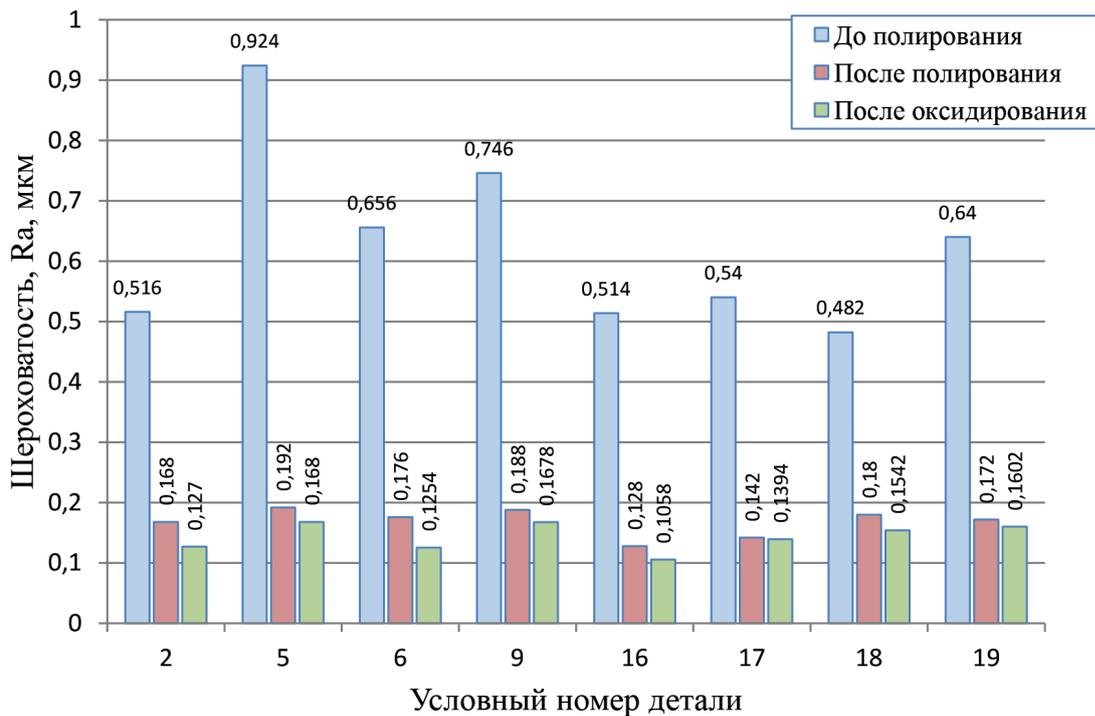


Рис. 4. Влияние полирования и оксидирования на шероховатость опытных образцов

Обсуждение (Discussion)

Анализ результатов исследования влияния температуры и длительности оксидирования азотированных образцов на геометрические параметры и коррозионную стойкость. На образцах после газового азотирования и оксидирования по различным вариантам получены слои, состоящие из поверхностного карбонитридного слоя толщиной 20 – 30 мкм, твердостью от 680 до 1400 HV_{0,025}, нижележащего слоя азотистого мартенсита толщиной от 8 до 10 мкм и зоны внутреннего азотирования толщиной от 0,25 до 0,4 мм. При этом не выявлено влияния температуры оксидирования на толщину и твердость слоя соединений и зоны внутреннего азотирования.

Следует отметить более высокую твердость опытных диффузионных слоев (после азотирования и оксидирования (в среднем $330 HV_1$ на расстоянии 0,05 мм от поверхности) по сравнению с хромированными ($225 HV_1$). Зона соединений характеризуется столбчатым строением. В зоне внутреннего азотирования преобладают выделения нитридов из твердого раствора в виде игл. В приповерхностном слое сохраняется текстура исходного металла.

Анализ результатов метрологических и коррозионных испытаний образцов (см. табл. 4), обработанных в опытных режимах (азотирование и оксидирование) с различной температурой оксидирования ($350\text{ }^{\circ}\text{C}$, $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $580\text{ }^{\circ}\text{C}$), в сравнении с контрольным режимом (хромирование), показал следующее:

1. При низкотемпературном оксидировании ($350\text{ }^{\circ}\text{C}$) величина диаметра практически не изменяется. С повышением температуры оксидирования увеличивается прирост диаметра. Оксидирование при температуре $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличивает диаметр на 5,4 мкм в среднем, оксидирование при температуре $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ — на 6,3 мкм.

2. Коррозионная стойкость опытных образцов после газового азотирования и оксидирования значительно превышает стойкость контрольных хромированных образцов. Так, время появления первых очагов коррозии на хромированных образцах в среднем составляет 14 ч, на опытных — от 103 до 187 ч.

3. С повышением температуры оксидирования от 350 до $550 - 580\text{ }^{\circ}\text{C}$ коррозионная стойкость образцов снижается в среднем от 187,5 до 103,5 ч, т. е. на 45 %. Таким образом, на основании анализа полученных результатов оптимальной температурой оксидирования является $350\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Анализ приведенных в табл. 5 данных показывает, что с увеличением времени оксидирования азотированных образцов от 1 до 6 ч происходит увеличение их коррозионной стойкости. Так, при оксидировании в течение 1 – 3 ч первые очаги коррозии на боковой и донной поверхности появляются через 8 – 49 ч. При оксидировании в течение шести часов первые очаги коррозии появляются через 108 – 168 ч. Хромированные образцы показали меньшую стойкость по сравнению с азотированными и оксидированными — на их поверхности коррозия начинается через 4 – 24 ч.

Анализ результатов (см. табл. 7) показал, что скорость распространения коррозии на поверхности хромированных образцов значительно выше, чем на поверхности азотированных и оксидированных ($350\text{ }^{\circ}\text{C}$, 6 ч). После 120 ч испытания вся поверхность хромированных образцов была поражена коррозией, а на опытных образцах за это же время было поражено не более 10 % всей поверхности. Даже после 1128 ч испытаний лишь один из четырех опытных образцов был полностью поражен коррозией, на остальных трех площадь, занятая коррозией, составила 30 – 80 %. Высокая скорость распространения коррозии на хромированных образцах можно объяснить тем, что слой хрома является катодным покрытием по отношению к стали. Это способствует быстрому развитию коррозии после появления первых точек коррозии в атмосферных условиях.

Таким образом, режим химико-термической обработки, состоящий из газового азотирования и оксидирования при $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение шести часов обеспечивает более высокую коррозионную стойкость образцов в сравнении с контрольными — хромированными.

Анализ результатов стеновых испытаний опытных образцов. Анализ данных результатов металлографического и рентгеноструктурного исследования опытных образцов (см. табл. 7) показал, что для стеновых испытаний отобраны образцы с толщиной оксидного слоя, равной 1 мкм, толщиной карбонитридного слоя — 16 – 18 мкм, твердостью карбонитридного слоя — $HV_{0,025} 700$, толщиной зоны внутреннего азотирования — 0,3 – 0,36 мм. Фазовый состав оксидной пленки представляет из себя магнетит Fe_3O_4 , слой соединений состоит из карбонитридов Fe_3N и Fe_4N . Таким образом, опытные образцы, отобранные для стеновых испытаний, соответствуют по толщине защитного слоя требованиям контрольных хромированных.

Анализ результатов измерения наружного диаметра и шероховатости рабочей поверхности образцов, отобранных для стендовых испытаний (см. табл. 8), показал, что шероховатость опытного образца (№ 1) после газового азотирования и оксидирования при 350 °С в течение шести часов завышена и Ra составляет 0,3 мкм вместо максимальной Ra = 0,2 мкм. Шероховатость опытного образца (№ 2) соответствует требованиям чертежа. Геометрические параметры опытных образцов (диаметр и длина) в обоих случаях соответствуют заданным требованиям. Этот факт объясняется тем, что опытные образцы не подвергались полированию, в то время как контрольные после хромирования подвергались окончательному шлифованию.

Из табл. 9 и 10, а также рис. 2 и 3 видно, что после испытания на коррозионную стойкость образцов, прошедших стендовые испытания на долговечность, хромированные образцы закорродировали полностью через 120 ч с нарушением сплошности хромового покрытия и проникновением коррозии в металл. Опытные образцы после газового азотирования и оксидирования закорродировали полностью только через 1128 ч, при этом нарушения сплошности карбонитритного слоя и проникновения коррозии в металл не выявлено. Для всех опытных образцов характерна низкая скорость распространения коррозии в условиях испытаний.

Анализ влияния операции полирования на шероховатость опытных образцов. Анализ данных, приведенных в табл. 11 (графы 2 – 4 и 7 – 9) и на рис. 4, показывает, что после полирования азотированных образцов (перед оксидированием) шероховатость наружной цилиндрической поверхности Ra составляет 0,12 – 0,19 мкм, что соответствует заданным требованиям ($Ra \leq 0,2$ мкм). Величина наружного диаметра в результате полирования уменьшилась на 4 – 9 мкм, что могло привести к удалению окисной пленки с поверхности образцов, играющей значительную роль в повышении коррозионной стойкости деталей.

Анализ данных (графы 5, 6, 10, 11 табл. 11, рис. 4) показывает, что после оксидирования предварительно отполированных образцов, шероховатость снижается и Ra = 0,10 – 0,16 мкм, что также соответствует установленным требованиям. Снижение шероховатости образцов в процессе оксидирования, вероятно, связано с заполнением окислами впадин поверхностного рельефа.

Заключение (Conclusion)

Проведенные исследования, направленные на разработку альтернативного твердому хромированию способа поверхностного упрочнения деталей судовых технических средств, показали, что максимальной коррозионной стойкостью, в 6 – 10 раз превосходящей стойкость контрольных (хромированных) образцов, обладают опытные образцы после газового карбонитрирования с охлаждением в масле и оксидирования в воздушной среде при 350 °С в течение шести часов.

В результате стендовых испытаний было установлено, что опытные образцы после газового азотирования и оксидирования соответствуют установленным требованиям по долговечности и не уступают контрольным — хромированным. Оба типа покрытия в условиях стендовых испытаний в равной степени не защищают образцы от механического износа наружной цилиндрической поверхности.

После испытаний коррозионной стойкости образцов, прошедших стендовые испытания на долговечность, установлено, что контрольный (хромированный) образец закорродировал полностью через 120 ч с нарушением сплошности хромового покрытия и проникновением коррозии в металл. Опытные образцы через 1128 ч закорродировали не по всей наружной поверхности, при этом нарушения сплошности карбонитридного слоя и проникновения коррозии в металл не выявлено.

Установлено, что шероховатость поверхности азотированных образцов после полирования уменьшается с Ra = 0,3 мкм до Ra = 0,12 – 0,19 мкм, что соответствует установленным требованиям ($Ra \leq 0,2$ мкм); величина наружного диаметра в результате полирования уменьшается на 4 – 9 мкм; оксидирование при 350 °С в течение шести часов, выполненное после полирования, приводит к снижению шероховатости до Ra = 0,10 – 0,16 мкм, при этом величина наружного диаметра не изменяется.

Разработана альтернативная твердому хромированию технология поверхностного упрочнения деталей — технология оксикарбонитрирования, включающая следующие операции:

- стандартная механическая обработка;
- предварительный нагрев в воздушной атмосфере и выдержка в течение 60 мин при температуре от 350 °С до 400 °С;
- кратковременное газовое карбонитрирование в атмосфере аммиака и экзогаза при их соотношении от 1 : 1 до 1 : 4 при 600 – 630 °С с охлаждением в масле или экзогазе;
- полирование в заданный размер;
- оксидирование в воздушной среде при температуре в диапазоне от 300 °С до 400 °С продолжительностью до шести часов.

В результате использования данной технологии возможно получение деталей с повышением коррозионной стойкости при снижении деформаций, а также увеличение их размерной точности. Разработанная технология оксикарбонитрирования после соответствующей адаптации может быть использована при изготовлении деталей судового машиностроения вместо традиционного твердого хромирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Погодаев Л. И.* Надежность судового оборудования: монография / Л. И. Погодаев, А. А. Кузьмин, Ю. К. Лопарев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 124 с.
2. *Хмелевская В. Б.* Выбор технологий и материалов для повышения надежности судового оборудования: монография / В. Б. Хмелевская, А. А. Кузьмин. — СПб.: СПГУВК, 2005. — 211 с.
3. *Роговський І. Л.* Ефективність відновлення деталей плунжерних пар паливних насосів сільськогосподарської техніки / І. Л. Роговський, Л. Л. Роговський // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. — 2015. — № 212-1. — С. 163–172.
4. *Эшкабилов Х. К.* Регулируемая технология нитрооксидирования низколегированной стали / Х. К. Эшкабилов, Ш. А. Бердиев // International Scientific and Practical Conference World science. — 2016. — Т. 1. — № 2 (6). — С. 69–74.
5. *Зинченко В. М.* Азотный потенциал: современное состояние, проблемы и концепции развития / В. М. Зинченко [и др.]; под ред. Б. А. Прусакова. — М.: ФГПУ «Изд-во Машиностроение», 2003. — 90 с.
6. *Коган Я. Д.* Оксизотирование металлических изделий / Я. Д. Коган, Х. К. Эшкабилов // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2006. — № 6. — С. 10–16.
7. *Winning J.* Neues Verfahren und Anlagen zum Nitrieren mit E-verbindingesscyicht / J. Winning // HTM. — 1974. — Vol. 29. — No. 1. — Pp. 42–49.
8. *Герасимов С. А.* Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов / С. А. Герасимов, Л. И. Куксенова, В. Г. Лаптева. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 520 с.
9. *Герасимов С. А.* Особенности формирования структуры и трибологических свойств азотированных сталей и сплавов / С. А. Герасимов, Л. И. Куксенова, М. С. Алексеева // Вестник научно-технического развития. — 2017. — № 7 (119). — С. 3–17.
10. Nanostructured Coating / Edited by A. Gavaleiro, J. T. De Hosson. — Berlin: Springer-Verlag, 2006. — 648 p.
11. *Шевчук А. М.* Влияние азотирования на структуру и свойства сталей / А. М. Шевчук, Д. А. Негров, В. Ю. Путинцев // Техника и технологии машиностроения: материалы V Международной студенческой науч.-практ. конф. — Омск: Омский государственный технический университет, 2016. — С. 421–425.
12. *Кусманов С. А.* Повышение коррозионной стойкости низкоуглеродистых сталей электролитно-плазменным насыщением азотом и углеродом / С. А. Кусманов, Е. П. Гришина, П. Н. Белкин [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2017. — № 2 (740). — С. 52–59.
13. *Ковальчук А. В.* Комплексное поверхностное упрочнение стальных изделий / А. В. Ковальчук, С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, Г. А. Ткаченко // Литье и металлургия. — 2014. — № 4 (77). — С. 144–150.
14. Пат. 1780340, АС СССР, МПК С23С 8/26. Способ химико-термической обработки стальных деталей / Н. В. Богданова, А. К. Тихонов, Н. И. Сардаев [и др.]; опубл. 27.03.1995.

15. Пат. № 2478137, Российская Федерация, МПК С23С 8/34. Способ химико-термической обработки стальных изделий / Н. В. Богданова, А. С. Кочергин, Е. М. Евграфов; заяв. и патентообл. ОАО «АВТО-ВАЗ». — № 2011126851/02; Заявлено 29.06.2011; опубл. 10.01.2013. — Бюл. № 9.

16. Коробочка О. Н. Внедрение оксикарбонитрирования взамен твердого хромирования / О. Н. Коробочка, О. Г. Чернета, Р. Г. Волощук // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Автомобиле- и тракторостроение. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. — № 8 (1117). — С. 127–132.

REFERENCES

1. Pogodaev, L.I., A.A. Kuz'min, and Yu.K. Loparev. *Nadezhnost' sudovogo oborudovaniya. Monografiya*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2015.
2. Khmelevskaya, V.B., and A.A. Kuz'min. *Vybor tekhnologii i materialov dlya povysheniya nadezhnosti sudovogo oborudovaniya. Monografiya*. SPb.: SPGUVK, 2005.
3. Rogovs'kii, I.L., and L.L. Rogovs'kii. "Efektivnist' vidnovlennyya detalei plunzhernikh par palivnikh nasosiv sil'skogospodars'koi tekhniki." *Naukovii visnik NUBiP Ukraini. Seriya: Tekhnika ta energetika APK* 212-1 (2015): 163–172.
4. Eshkabilov, Kh.K., and Sh.A. Berdiev. "Reguliruemaya tekhnologiya nitrooksidirovaniya nizkolegirovanoi stali." *International Scientific and Practical Conference World science* 1.2(6) (2016): 69–74.
5. Zinchenko, V.M., et al. *Azotnyi potentsial: sovremennoe sostoyanie, problemy i kontseptsii razvitiya*. Edited by B.A. Prusakov. M.: FGPU «Izd-vo Mashinostroeniye», 2003.
6. Kogan, Ya.D., and X.K. Eshkabilov. "Oxynitriding of metal parts." *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* 6 (2006): 10–16.
7. Winning, J. "Neues Verfahren und Anlagen zum Nitrieren mit E-verbindingesscyicht." *HTM* 29.1 (1974): 42–49.
8. Gerasimov, S.A., L.I. Kuksenova, and V.G. Lapteva. *Struktura i iznosostoikost' azotirovannykh konstruktivnykh staley i splavov*. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2014.
9. Gerasimov, S.A., L.I. Kuksenova, and M.S. Alekseeva. "Peculiarities of structure and tribological properties formation of the nitrided steel and alloy." *Bulletin of Science and Technical Development* 7(119) (2017): 3–17.
10. Gavaleiro, A., and J.T De Hosson. *Nanostructured Coating*. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
11. Shevchuk, A.M., D.A. Negrov, and V.Yu. Putintsev. "Vliyaniye azotirovaniya na strukturu i svoystva staley." *Tekhnika i tekhnologii mashinostroeniya: materialy V Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016. 421–425.
12. Kusmanov, S.A., E.P. Grishina, P.N. Belkin, Yu.V. Kusmanova, and N.O. Kudryakova. "Raising the corrosion resistance of low-carbon steels by electrolytic-plasma saturation with nitrogen and carbon." *Metal Science and Heat Treatment* 59.1-2 (2017): 117–123. DOI: 10.1007/s11041-017-0114-0
13. Kovalchuk, A.V., S.V. Konstantinov, F.F. Komarov, and G.A. Tkachenko. "Complex surface hardening of steel articles." *Foundry production and metallurgy* 4(77) (2014): 144–150.
14. Bogdanova, N.V., A.K. Tikhonov, N.I. Sardaev, M.A. Krishtall, and A.A. Talantsev. USSR 1780340 A1, IPC S23S 8/26. Sposob khimiko-termicheskoi obrabotki stal'nykh detalei. Publ. 27 March 1995.
15. Bogdanova, N.V., A.S. Kochergin, and E.M. Evgrafov. RU 2 478 137 C2, IPC C 23 C 8/34. Sposob khimiko-termicheskoi obrabotki stal'nykh izdelii. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Jan. 2013.
16. Korobochka, O.N., O.G. Cherneta, and R.G. Voloshchuk. "Vnedrenie oksikarbonitrirovaniya vzamen tverdogo khromirovaniya." *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp. : Avtomobile- i traktorstroenie*. № 8 (1117). Khar'kov: NTU «KhPI», 2015. 127–132.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Богданова Наталья Васильевна —
 кандидат технических наук
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: nabol46@mail.ru,
kaf_tmm@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bogdanova, Natal'ya V. —
 PhD
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: nabol46@mail.ru,
kaf_tmm@gumrf.ru

Кузьмин Александр Алексеевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: kuzminaa@gumrf.ru

Шнуренко Анатолий Алексеевич —
доктор технических наук, коммерческий директор
ЗАО «Канонерский судоремонтный завод»

198184, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Канонерский остров, 41У

e-mail: dock@ksz.spb.ru

Kuz'min, Aleksandr A. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: kuzminaa@gumrf.ru

Shnurenko, Anatolii A. —

Dr. of Technical Sciences
Joint Stock Company Kanonersky Shiprepairing Yard

41 Kanonerskii ostrov, St. Petersburg, 198184,

Russian Federation

e-mail: dock@ksz.spb.ru

Статья поступила в редакцию 15 марта 2018 г.

Received: March 15, 2018.