

СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ФЛОТА

SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND FLEET OPERATION

Научная статья

УДК 620.178.16:621.879.45.064.004.62

<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-3-7-18>

EDN QHACZC

Износостойкость и совместимость исследуемых материалов для шарнирного узла черпаковой цепи

*Валерий Александрович Петровский[✉], Анатолий Рашидович Рубан,
Татьяна Владимировна Хоменко, Александр Викторович Мельников*

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, v_a_petrovsky@mail.ru[✉]*

Аннотация. Сложившаяся в настоящее время неблагоприятная экологическая и гидротехническая обстановка в некоторых регионах страны создала ряд серьезных проблем, для решения которых Правительством Российской Федерации были созданы проекты и программы, где дноуглубительные работы являются неотъемлемой частью. В частности выполняются работы многочерпаковыми земснарядами, основным элементом которых служит черпаковая цепь. Работоспособность и надежность цепи зависит от качества материалов, испытывающих высокие динамические нагрузки, и последствий абразивной среды, которая приводит к ускоренному износу шарнирного соединения. Приведены результаты исследования износных характеристик, диапазона совместимости сталей и сплавов шарнирного соединения черпаковой цепи земснарядов и описана технология восстановления этих элементов с увеличением ресурса узла соединения цепи. Экспериментальные исследования, моделирующие износ узла на малогабаритных образцах, определили износостойкость материалов пары. Использовался метод сравнительного анализа с эталонными парами. Экспериментальный материал составил 13 пар, включая 2 пары эталонов из стали 110Г13Л и 38ХН3МА (втулка – палец) и 110Г13Л (втулка и палец), остальные пары из материалов стали 35, 45, 110Г13Л, 38ХН3МА, износостойкой наплавкой электродами Э190Х5С7, наплавкой проволокой Св-08А, электродами Э 50 А (УОНИ 13/55), Э-46 (АНО-4) после комплекса термических обработок, химико-термических обработок, поверхностно-пластического деформирования, где на образцы действовала нагрузка 6 615 Н (675 кгс) в водно-абразивной среде, подвергались испытанию на машине трения. Выявлены принципиальные зависимости и построены графики влияния твердости образцов и содержания углерода на поверхности трения на износостойкие характеристики различных структурных классов. Определены перспективные пары для натуральных испытаний: 1) сталь 110Г13Л (втулка) – наплавка Св-08А с химико-термической обработкой (палец); 2) сталь 38ХН3МА (втулка) – сталь 35 с химико-термической обработкой (палец); 3) сталь 35 с химико-термической обработкой (втулка) – наплавка Св-08А с химико-термической обработкой (палец).

Ключевые слова: черпаковая цепь, износостойкость пары трения, изменение структуры и фазового состава, наплавка, восстановление шарнирного узла, цементация стали

Для цитирования: Петровский В. А., Рубан А. Р., Хоменко Т. В., Мельников А. В. Износостойкость и совместимость исследуемых материалов для шарнирного узла черпаковой цепи // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2023. № 3. С. 7–18. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-3-7-18>. EDN QHACZC.

Original article

Wear resistance and compatibility of test materials for scoop chain hinge

Valeri A. Petrovsky[✉], Anatoliy R. Ruban, Tatyana V. Khomenko, Alexander V. Melnikov

Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, v_a_petrovsky@mail.ru[✉]

Abstract. The current unfavorable environmental and hydro-technical situation in some regions of the country has created a number of serious problems. The government of the Russian Federation has created projects and programs where dredging is an integral part. There are carried out dredging works, among other things, by multi-bucket dredgers, where a scoop chain is the main working body. The performance and reliability of the chain depends on the quality of materials that experience high dynamic loads, and the consequences of the abrasive environment, which leads to accelerated wear of the swivel. There are given the results of the study of wear characteristics, the range of compatibility of steels and alloys of the hinged connection of the dredger bucket chain and the technology for the restoration of these elements, with an increase in the resource of the chain connection unit. Experimental studies simulating the wear of the assembly on small-sized samples determined the wear resistance of the materials of the pair. The method of comparative analysis with reference pairs was used. The experimental material consisted of 13 pairs, including 2 pairs of standards made of steel 110Mn13, 38CrNi3M (sleeve-finger) and steel 110Mn13 (sleeve and finger), where the remaining pairs were made of materials: steels C35K, C45K, 110Mn13, 38CrNi3Mo, wear-resistant surfacing with E – 190Cr5Si7 – LEZ – T – 590 – NG electrodes, surfacing with wire SV08A, electrodes E50A – UONI 13/55 (E513B20H), E46 – ANO-4 (E433R24) after a complex of heat treatments, chemical-thermal treatments, surface plastic deformation, where the samples were subjected to a load of 6615 N (675 kgf) in water-abrasive medium, were tested on the friction machine. Fundamental dependences are revealed and graphs of the influence of the hardness of the samples and the carbon content of the friction surface on the wear-resistant characteristics of various structural classes are plotted. Promising pairs for full-scale tests were determined: 1. steel 110Mn13 (sleeve) – surfacing SV08A with chemical-thermal treatment (finger); 2. steel 38CrNi3Mo (sleeve) – steel C35K with chemical-thermal treatment (finger); 3. steel C35K with chemical-thermal treatment (sleeve) – cladding SV08A with chemical-thermal treatment (finger).

Keywords: scoop chain, wear resistance of a friction pair, change in structure and phase composition, surfacing, restoration of the hinge assembly, carburizing of steel

For citation: Petrovsky V. A., Ruban A. R., Khomenko T. V., Melnikov A. V. Wear resistance and compatibility of test materials for scoop chain hinge. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2023;3:7-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-3-7-18>. EDN QHACZC.

Введение

Преобладание в региональном арсенале спецфлота земснарядов землесосного типа с рыхлителями и гидромониторами резко ограничивает возможности по разработке тяжелых и агрессивных типов грунта и возможности транспортировки на дальние расстояния от места добычи, чем обладают многочерпаковые земснаряды [1]. Отсутствие или локальное применение современных научно обоснованных методов восстановления сменно-запасных частей к рабочим органам земснарядов на судоремонтных предприятиях Астраханского региона снижает эффективность использования всего спецфлота. Следует заметить, что ранее построенный на судостроительном заводе «Лотос» многочерпаковый земснаряд имел ответственные шарнирные узлы черпаковой цепи, изготовленные из традиционных малоперспективных марок сталей по устаревшим технологиям.

В планах текущего года предусмотрено дноуглубление Волго-Каспийского морского судоходного канала в объеме 12 млн м³, что позволит уве-

личить проход судов с осадкой 4,5 м и возможность нарастить общий грузопоток в пределах международного транспортного коридора «Север – Юг» [2].

Единственный тип земснарядов, который конструктивно и эффективно организован для разработки и транспортирования извлеченного тяжелого типа грунта на дальние расстояния с помощью грунтоотвозных шаланд, – многочерпаковый земснаряд. Способность высокопроизводительно разрабатывать грунты II–VII группы по трудности добычи обуславливает повышенный износ всего рабочего инструмента и в большей степени черпаков и узла шарнирного соединения.

Как свидетельствует мировая практика [3], для развитых стран расходы, связанные с последствиями механического износа, насчитывают 1–3 % от национального продукта, 55 % [4] составляет потеря металла (из общей потери металла), относящаяся к механической деградации поверхности трения.

Процесс трения с находящимся в зазоре соединения абразивом, включая продукты износа, опре-

деляется зарубежными исследователями [5] как закрытый абразивный износ (closed abrasion). В российской терминологии процессы взаимного сочетания разрушения поверхностей трения в соединении от абразивного микрорезания, усталостного износа, глубинного вырывания (схватывания) микрообъемов сплава классифицируются как сложный вид износа, который исследуется в узле соединения многочерпакового земснаряда. При разработке различных типов грунта доминирование процессов может меняться от схватывания до самого агрессивного – абразивного [6, 7].

Новизна научного исследования заключается в применении рационального цикла испытаний материалов шарнирного узла на трущихся парах малогабаритных образцов с абразивной прослойкой и определении износостойкости пары в условиях, моделирующих эксплуатационные характеристики узла с перспективой постановки эксперимента в натуральных условиях. Как правило, рациональный цикл испытаний сводится к определению износных характеристик узла в эксплуатационных условиях, что является достаточно продолжительным по времени (навигация) и содержит составляющую риска в случае катастрофического износа или поломки. Сведение к минимальным временным потерям [8] при испытании широкого набора пар трения позволяет оптимизировать затраты на испытания.

Обзор источников [9, 10] подтвердил, что попытки повысить износостойкость узла шарнирного соединения предпринимались за все время существования дноуглубительного флота. Применялись материалы пар с различным сочетанием сталей, сплавов, чугунов, с термообработкой, термоциклической обработкой, пластическим поверхностным деформированием, химико-термической обработкой, износостойкой наплавкой. Недостаток сведений в источниках по количественным и качественным показателям износа пары, а также отсутствие данных по нагрузкам в узле, условиям внешних факторов, качеству грунта, динамике движения цепи и т. д. затрудняет проведение сравнительного анализа испытываемых материалов [6, 9, 10]. В источниках, как правило, проводилось сравнение с эталонной парой, где втулка и палец изготовлены из стали 110Г13Л или Г13, однако в [11] приведены доводы, доказывающие, что нет оснований в данных условиях считать сталь 110Г13Л износостойкой из-за отсутствия значительного упрочнения при низких деформационных нагрузках. В парах с «высокой» износостойкостью применялись материалы: сталь Г13 (палец) – 30ХГСА (втулка); сталь 120Г13 (палец) – 30ХГСА или 37ХНЗА (втулка); сталь 40 (палец) – высокопрочный чугун с шаровидным графитом (втулка); без указания материала ответной детали – сталь 45 (палец) по-

сле закалки и низкого отпуска; сталь 18ХГТ (втулка) после цементации и отпуска; стали 110Г13Ф2Л и 110Г13Х3Л (палец) после термообработки; 110Г13Л (палец) с пластическим поверхностным деформированием; 110Г13Л (палец) с термоциклической обработкой, наплавка износостойкими электродами Т-620, 12 АН/ЛИВТ (палец); сталь 20Х (палец) после цементации и отпуска. Противоречивы сведения по стали 45 с электролитическим борированием и термообработкой [9, 10]. В статье [12] дан ряд материалов и сплавов, используемых в существующих узлах соединения: стали 30ХГСА, 38ХНЗМА, 40ХН2, 50ХГФ, 60С2, 110Г13Л с соответствующей термообработкой.

Прогнозирование износостойкости при различных видах изнашивания является достаточно сложной задачей из-за отсутствия простого и надежного комплекса факторов, связанного с механическими и технологическими характеристиками металлов и сплавов с внешним действием сил, характером движения и среды. Существует большое количество научных работ, ориентированных на определение связи износостойкости с характеристиками материала. В качестве критериев рассматривались механические свойства материалов: предел прочности σ_b , предел усталости σ_{-1} , предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное сужение ψ , модуль упругости E , твердость HB , микротвердость, сопротивление срезу τ и др. Как подтвердили результаты исследований, однозначной зависимости износостойкости в широком диапазоне структур материалов не определяется. Удовлетворительной корреляции можно достигнуть только в ограниченных пределах групп материалов со схожим фазово-структурным составом. Связать отдельные механические показатели в единый оценочный параметр оказалось более продуктивным. Так, в работе [13] были предложены критерии, как более сложные, так и упрощенного типа, а в результате исследований и анализа установлено, что пределы зависимости износостойкости с комплексными оценками также имеют свои ограничения по структурным классам и видам износа. Более универсальным характером оценки износостойкости обладают критерии, связанные с энергетической составляющей процесса износа и применяемые для различных видов изнашивания. Достаточно простым критерием является комплекс $\sigma_b\psi$ [11, 14], где σ_b – предел прочности при растяжении; ψ – относительное сужение при разрыве. Стоит отметить, что данный комплекс дает оценку износостойкости только вместе с твердостью, что создает трудности в применении к определению ресурса узла [13].

Основная проблема оценки износостойкости узла, деталей состоит не в выборе критерия или оценочного комплекса, адекватно связывающего доми-

нирующий процесс разрушения поверхностей трения с износом, а в том, что в период эксплуатации земснаряда происходит смена основных факторов, влияющих на вид деградации пары трения, которые определяют интенсивность изнашивания узла. К таким факторам относятся изменение количества и качества абразива (твердость, зернистость), попадающего в зазор соединения; резкое увеличение удельной нагрузки (тяжелые грунты); увеличение скорости движения цепи (легкие, песчаные грунты). Вид изнашивания узла соединения, представляющий комплексный процесс воздействия динамической нагрузки, полиморфных превращений, микрорезания, образование адгезионных связей (схватывание), усталостного разрушения, может меняться в течение навигации не один раз. Так, известная модель линейного изнашивания И. В. Крагельского [7, 15], интенсивности изнашивания имеет вид:

$$I_h = i_h p_a / HB,$$

где i_h – удельный износ фрикционной связи, определяющий масштабный уровень процесса изнашивания, может принимать значения от 10^{-1} (микрорезание) до $1,59 \cdot 10^{-8}$ (упругий контакт) при различных видах взаимодействий, указывает на переход от одной частной модели износа к другой; p_a / HB – показатель (критерий) напряжения фактического контакта.

Так, пара шарнирного узла черпаковой цепи, изготовленная из стали 110Г13Л, показывающая приемлемый результат износа на грунтах средней группы по тяжести разработки (III–V) и не получившая достаточного упрочнения, в отдельных случаях имеет катастрофический износ за сутки производства работ на грунтах, состоящих в основном из кварцевого песка.

Таким образом, процессы трибомутации в период эксплуатации существенно меняют свойства трибосопряжения и влияют на ресурс шарнирного узла и работоспособность земснаряда в целом.

Ключевым фактором для расчета долговечности соединения является нахождение интенсивности изнашивания (или другой производной износа) втулки и пальца для конкретного типа земснаряда, учитывающего характерные условия эксплуатации.

Все механические характеристики (кроме модуля упругости E) являются структурно зависимыми и показывают значения, относящиеся к начальным характеристикам поверхности трения, подвержены изменению в процессе износа. Как правило, все критерии применяются для оценки абразивного, ударно-абразивного, гидроабразивного износа, где деградация поверхности рассматривается как действие абразивных частиц. Это касается и узлов трения, где взаимное движение поверхно-

стей трения совершается с абразивной прослойкой, без учета скорости взаимных перемещений, характера движения, величины нагрузки, влияния среды. Согласно исследованиям, приведенным в [6, 9] и настоящей работе, значительное влияние оказывает материал контртела, участвующего в износе узла трения [12]. Разработанный критерий $W_{кр}$ [13, 16], который определяет критическую плотность потока мощности деформации, также имеет энергетическую основу и предполагает, что определенный микрообъем деформируемого материала способен аккумулировать строго ограниченную по величине и времени энергию, полученную в результате взаимодействия с другим контртелом (абразив, более твердая поверхность). Данный комплекс применим к абразивному, кавитационному и другим видам износа. Определение компонентов критерия связано с различными схемами нагруженного состояния поверхности, что приводит к ряду подобных критериев ограниченного применения. Попытка определения по предложенному критерию оценки износостойкости ряда материалов, исследуемых в настоящей работе, оказалась невозможной из-за сложности расчета по методике [10] и отсутствия в специальной литературе первичных данных по исследуемым сплавам и структурам поверхностных слоев материала.

Постановка задачи

Главная цель исследования – это научно обоснованная технология восстановления изношенных деталей узла соединения черпаковой цепи, замена существующих марок сталей на менее дефицитные и дорогостоящие материалы. При этом необходимо учитывать технологические возможности судоремонтных предприятий Астраханского региона. Задачи согласно цели исследования:

- определить приемлемые технологии восстановления изношенных деталей, в том числе способы упрочнения;
- подобрать материалы, удовлетворяющие технологическим и эксплуатационным требованиям;
- определить характеристики износостойкости пары, используя разработанный стенд, моделирующий характер движения, уровень динамического нагружения, действие среды;
- определить границы возможной совместимости пары по структурным характеристикам;
- провести анализ полученных результатов и сделать вывод о дальнейших действиях.

Методы исследования

На испытательном стенде (машина трения) [17], позволяющем моделировать условия эксплуатации материалов узла с некоторыми особенностями взаимодействия поверхностей трения и предназна-

ченном для работы с парой малогабаритных образцов, был применен экспериментальный метод, определяющий количественный износ массы каждого образца. На лабораторных аналитических весах модели ВЛР-200г-М определялась масса до и после эксперимента.

Для определения допустимой износостойкости материалов пар, отвечающих заявленным требованиям, был применен метод сравнительного анализа потери массы испытываемой пары с эталонными образцами, изготовленными из применяемых материалов и технологий упрочнения.

Экспериментальные образцы, изготовленные и прошедшие различные виды упрочнения, имеют форму части кольца с внутренним и наружным диаметрами 80, 100 мм соответственно и с шириной 10 и 15 мм соответственно [12]. Все образцы распределены попарно по возможной совместимости материалов, определена масса с точностью

до 0,0001 г, измерена твердость на прессе Роквелла по шкалам В и С. Все исходные данные заносятся в таблицу. Каждая серия испытаний состоит из 9 пар. Образцы шириной 15 мм являются неподвижными (модель втулки), шириной 10 мм – подвижные (модель пальца). Угол поворота – 30° с реверсивным движением. Период испытания одной пары составляет 1 000 циклов (192 мин). Нагрузка на образцы составляет 6 615 Н (675 кгс) на поверхности трения, порционно подается вода и песок, создавая избыток увлажненной массы абразива в зоне контакта. После испытаний образцы взвешиваются, определяется твердость в нескольких точках на поверхности трения. Усредненные показатели необходимой точности сводятся в таблицу.

Обсуждение результатов

Все данные, полученные до и после испытаний, представлены в единой таблице.

Результаты экспериментов

Experimental results

№ пары в серии	Образец (втулка/палец)	Материал: сталь, сплав	Вид ТО, упрочнение**	Структура поверхности трения***	Твердость до/после эксперимента	Износ Δm , г	Относительная износостойкость $\varepsilon = 1 / \Delta m$, г ⁻¹
1*	Подвижный (палец)	110Г13Л	Закалка 1 050 °С	А	88,2 HRB 20,5 HRC	0,2333	4,286
	Неподвижный (втулка)	38ХН3МА	Закалка 850 °С, высокий отпуск	ФП	90,7 HRB 35,9 HRC	0,2403	4,151
2*	Подвижный (палец)	110Г13Л	Закалка 1 050 °С	А	83,6 HRB 24,2 HRC	0,4010	2,493
	Неподвижный (втулка)	110Г13Л	Закалка 1 050 °С	А	90,0 HRB 24,3 HRC	0,1929	5,184
3	Подвижный (палец)	110Г13Л	Закалка 1 050 °С	А	77,0 HRB 27,5 HRC	0,3026	3,304
	Неподвижный (втулка)	Наплавка Св-08А	Цементация, закалка, отпуск	ПЦ	55,6 HRC 60,6 HRC	0,1597	6,261
4	Подвижный (палец)	45	Закалка 860–880 °С, низкий отпуск	ФП	38,9 HRC 34,8 HRC	0,2871	3,483
	Неподвижный (втулка)	Наплавка УОНИ 13/55	Цементация, закалка, отпуск	ПЦ	53,3 HRC 56,2 HRC	0,3242	3,084
5	Подвижный (палец)	110Г13Л	Закалка 1 050 °С + ППД	А	92,4 HRB 17,1 HRC	0,2548	3,924
	Неподвижный (втулка)	Наплавка Э190Х5С7	Отжиг 900 °С	ПК	41,6 HRC 43,9 HRC	0,2491	4,014
6	Подвижный (палец)	45	Закалка 860–880 °С, низкий отпуск	ФП	39,5 HRC 35,2 HRC	0,5513	1,813
	Неподвижный (втулка)	Наплавка Э190Х5С7	Отжиг 900 °С	ПК	44,4 HRC 34,1 HRC	0,5459	1,831

Окончание таблицы

Ending of the Table

№ пары в серии	Образец (втулка/палец)	Материал: сталь, сплав	Вид ТО, упрочнение**	Структура поверхности трения***	Твердость до/после эксперимента	Износ Δm , г	Относительная износостойкость $\varepsilon = 1 / \Delta m$, г ⁻¹
7	Подвижный (палец)	Наплавка Э190Х5С7 на АНО 4	Отжиг 900 °С	ПК	53,6 HRC 55,0 HRC	0,3798	2,633
	Неподвижный (втулка)	Наплавка Э190Х5С7 на Св-08А	Отжиг 900 °С	ПК	30,0 HRC 47,0 HRC	0,5715	1,749
8	Подвижный (палец)	Наплавка Э190Х5С7 на Св-08А	Отжиг 900 °С	ПК	46,6 HRC 55,8 HRC	0,1994	5,015
	Неподвижный (втулка)	Наплавка Э190Х5С7 на АНО 4	Отжиг 900 °С	ПК	40,8 HRC 56,4 HRC	0,6162	1,622
9	Подвижный (палец)	38ХНЗМА	Закалка ТВЧ, высокий отпуск	ФП	32,4 HRC 28,0 HRC	0,8608	1,161
	Неподвижный (втулка)	45	Закалка 860–880 °С, низкий отпуск	ФП	56,8 HRC 47,4 HRC	0,6427	1,556
10	Подвижный (палец)	38ХНЗМА	Закалка ТВЧ, высокий отпуск	ФП	33,0 HRC 33,1 HRC	0,2216	4,512
	Неподвижный (втулка)	35	Цементация, закалка, отпуск	ПЦ	50,6 HRC 57,0 HRC	0,1885	5,305
11	Подвижный (палец)	35	Цементация, закалка 1 и 2, отпуск	ПЦ	54,2 HRC 60,3 HRC	0,1531	6,531
	Неподвижный (втулка)	Наплавка Э190Х5С7 на Св-08А	Отжиг 900 °С	ПК	41,5 HRC 46,5 HRC	0,6963	1,436
12	Подвижный (палец)	35	Цементация, закалка 1 и 2, отпуск	ПЦ	64,0 HRC 61,3 HRC	0,1267	7,892
	Неподвижный (втулка)	Наплавка АНО 4 на Св-08А	Цементация, закалка 1 и 2, отпуск	ПЦ	62,8 HRC 51,1 HRC	0,1555	6,430
13	Подвижный (палец)	35	Цементация, закалка 1, высокий отпуск, закалка 2, отпуск	ПЦ	59,5 HRC 54,1 HRC	0,1012	9,881
	Неподвижный (втулка)	Наплавка Э190Х5С7 на АНО 4	Отжиг 900 °С	ПК	44,9 HRC 48,2 HRC	0,5842	1,711

*Пары, принятые за эталон: 110Г13Л (палец и втулка); 110Г13Л (втулка) и 38ХНЗМА (палец).

**ТО – термообработка; ППД – пластическое поверхностное деформирование; ТВЧ – закалка токами высокой частоты.

***А – аустенит; ФП – феррито-перлит; ПЦ – перлит, цементит; ПК – перлит, карбиды.

В результате испытаний построен график зависимости (рис. 1) износа Δm от твердости HRC (после испытаний) поверхностей трения пальца и втулок.

Аустенитная структура образцов в парах 1, 2, 3, 5, не получая упрочнение деформации и оставаясь стабильной, незначительно повышает износ Δm (линия А) с увеличением твердости. Феррито-

перлитная структура (линия ФП) при снижении твердости радикально изменяет поведение в сторону резкого увеличения износа в незначительном интервале. Стабильное снижение износа наблюдается в перлитно-цементитной структуре (линия ПЦ),

где увеличение твердости с 50 до 60 HRC повышает износостойкость. Перлитно-карбидная структура показала неустойчивую зависимость от влияния твердости (область ПК) на износ, сохраняя в основном высокие значения массового износа.

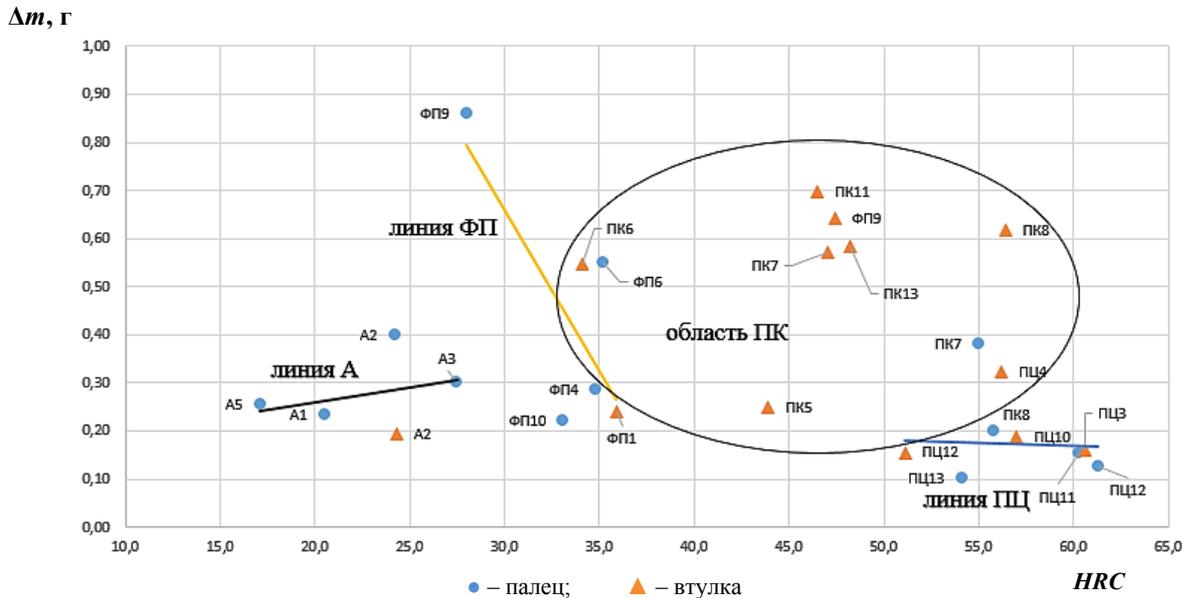


Рис. 1. Зависимости износа Δm образцов от твердости HRC (после испытаний) поверхностей трения
 Fig. 1. Dependences of wear Δm of specimens on hardness HRC (after testing) of friction surfaces

На рис. 2 приведена зависимость относительной износостойкости $\epsilon = 1 / \Delta m$ от содержания

углерода C, %, на поверхности трения различных структур.

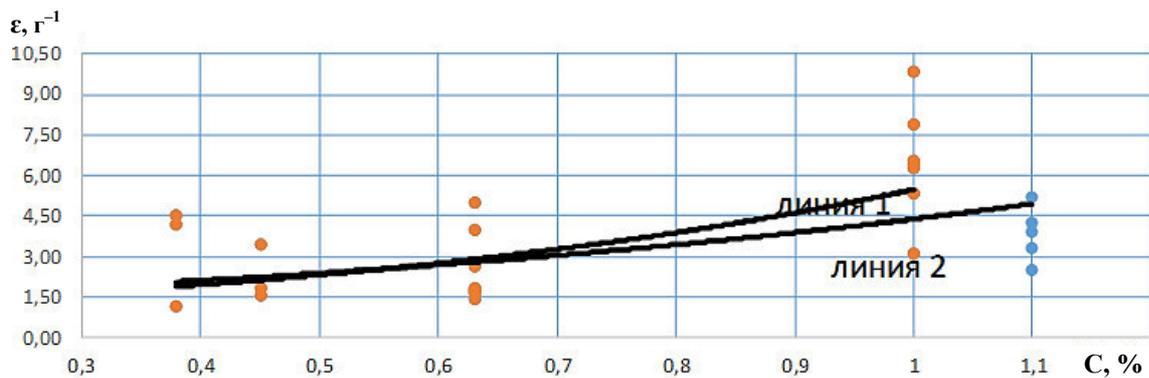


Рис. 2. Зависимость относительной износостойкости от содержания углерода в деталях узла
 Fig. 2. Dependence of relative wear resistance on carbon content in assembly parts

Твердость не оказывает влияние на изменение износостойких характеристик при повышении содержания углерода без упрочняющей термообработки [11]. Согласно графику существенное повышение износостойкости связано с изменением структуры, обусловленным полиморфными превращениями при высоком содержании углерода.

Образцы в парах 3, 10–13 с цементованными поверхностями показали самую высокую износостойкость (линия 1), тогда как образцы с аустенитной структурой изменяют общую зависимость (линия 2) к снижению износостойкости. Высокое содержание углерода C в аустенитной матрице (1,1 %) не реализуется повышением твердости из-за низких упроч-

няющих нагрузок и образованию λ -фазы мартенсита деформации.

В паре 3 подвижный образец из стали 110Г13Л показал удовлетворительный результат, тогда как неподвижный с наплавкой Св-08А и упрочненной поверхностью превысил эталонные значения износостойкости в 1,2 раза. Высокая твердость цементованного слоя 60,6 *HRC* и пластичность аустенитной структуры показывают удовлетворительные износные характеристики: $\varepsilon = 3,304$ и 6,261 соответственно.

Пара 4, состоящая из образца закаленной стали 45 и цементованной наплавки электродами УОНИ 13/55 (см. табл.), показала износ неподвижного образца, превышающий эталонное значение. Дегридурующая феррито-перлитная структура поверхности стали 45, шаржированная дробленным абразивом, повышает износ контрообразца даже с высокой твердостью 56,2 *HRC*.

Пара 5 продемонстрировала износ в удовлетворительных пределах $\Delta m = 0,25$ г (близких к эталонам) при низкой твердости (17 *HRC*) подвижного образца (палец) – из стали 110Г13Л, имеющей структуру легированного аустенита, и контрообразца с наплавкой Э190Х5С7 со структурой перлита и карбидных фаз с твердостью 43,9 *HRC*. Сочетание твердых карбидных фаз, легированных Cr, находящихся еще и в твердом растворе матрицы Fe_α неподвижного образца и пластичной матрицы Fe_γ (аустенит), легированного марганцем Mn без образования мартенсита деформации (λ -фазы), проявили способность к активному сопротивлению износу с абразивной прослойкой. Высокие значения показателей пластичности стали 110Г13Л ($\psi = 40\%$) [18] снижают вероятность разрушения твердых карбидных фаз наплавки Э190Х5С7. Также резкое различие структурных компонентов образцов не способствует схватыванию, что уменьшает общие потери материала на поверхности трения. Структура легированного Mn аустенита в ходе эксперимента получила незначительное упрочнение с 92,8 *HRB* до 17 *HRC*.

Пара 6 с подвижным образцом из стали 45, имеющая структуру перлитно-ферритного состава с твердостью 35,2 *HRC*, и контрообразцом с наплавкой Э190Х5С7, структурой перлит-карбиды, с твердостью 34,1 *HRC* показала неудовлетворительный износ: $\Delta m = 0,5513$ и 0,5459 г соответственно. При установке на испытательный стенд подвижный образец (сталь 45) имел твердость 39,5 *HRC*, неподвижный образец (Э190Х5С7) – 44,4 *HRC*. В результате действия разупрочняющих факторов (высокая температура в точках касания) образцы снизили твердость и, как следствие, показали высокий износ.

Пару 7 и 8 необходимо рассмотреть совместно, т. к. взаимодействующие поверхности структурно

идентичны с наплавкой Э190Х5С7 (см. табл.). Неподвижные образцы показали износ, превышающий эталонные значения в 1,5–3 раза, при этом подвижные образцы показали удовлетворительный результат в пределах эталонных значений 0,23–0,4 г. Зависимость износа от схемы испытания образцов влияет на результат. Можно добавить, что образцы, имеющие идентичные структуры, склонны к образованию (схватыванию) прочных связей в микрообъемах под действием высоких нагрузок и температуры, приводящих к глубинному вырыванию. Визуальный осмотр поверхности трения образцов с увеличением в 24 раза показал более высокий и неравномерный рельеф по сравнению с образцами пары 5, где материалы имеют различные структуры и сглаженный рельеф поверхности, даже имея более низкую твердость (сталь 110Г13Л). Все пары (кроме 5), имеющие неподвижные образцы (пары 6, 7, 8, 11, 13) с наплавкой Э190Х5С7, показали неудовлетворительный результат (см. табл.), превышающий эталон до 3,5 раз. Высокие значения износа [17] объясняются действием разупрочняющих факторов в микрообъемах перлитных структур отпуска (пара 6), где твердость снизилась на 4–10 единиц: с 39,5 и 44,1 *HRC* до 35,2 и 34,1 *HRC* соответственно.

Высокая нагрузка, способствующая интенсивной пластической деформации и наклепу в прилегающих к поверхности трения слоях, в парах 7, 8, 11, 13 с наплавкой Э190Х5С7, где твердость повысилась на 3–17 единиц до 46,5–56,4 *HRC*, привела к охрупчиванию твердой фазы [10], т. е. процесс происходит на границе хрупко-вязкого разрушения [12]. Следует заметить, что неподвижные образцы пар из стали 35 (см. табл.) в парах 11 и 13, имеющие сходную структуру с наплавкой Э190Х5С7, показали хороший результат: $\Delta m = 0,15$ и 0,1 г соответственно. Склонность наплавки Э190Х5С7 к образованию трещин и микротрещин влияет на хрупкое разрушение усталостного характера в условиях знакопеременного (реверсивного) движения в контакте с абразивом и контртелом, имеющего сопоставимую или выше твердость при высоких динамических нагрузках.

Согласно лабораторным исследованиям химического состава наплавки Э190Х5С7 содержание химических элементов: C – 0,63 %; Si – 5,35 %; Cr – 5,1 %; Mn – 0,75 %; Ni – 0,12 % против заявленных C – 1,4–2,0 %; Si – 6,5–10,0 %; Cr – 4,5–6,0 % в наплавленном металле. Для обеспечения технологичности восстановления пальцев узла соединения был проведен отжиг с целью снижения твердости наплавленного слоя с 58–63 *HRC* до 30–46 *HRC*, что позволило провести токарную обработку заготовок под образцы. Низкое содержание углерода и состав

фактической структуры изменили механические свойства сплава.

Пара 9 из образцов стали 45 и 38ХНЗМА имела сходную феррито-перлитную структуру и показала самый высокий износ при разности твердости в 19 единиц. В ней преобладал процесс схватывания и разрушения поверхности трения от разупрочняющих факторов при активном микрорезании.

Пара 10 с хорошими показателями износостойкости, сочетающая сталь 38ХНЗМА подвижного образца феррито-перлитной структуры, ниже средней твердости 33,1 HRC, с неподвижным образцом из цементованной стали 35, с твердостью 57,0 HRC, показывает резкое повышение износостойкости стали 38ХНЗМА, по сравнению с парой 9, со структурой перлитно-цементитного класса.

Пары 10–13, в которых образцы имеют структуру цементованного слоя (а в паре 12 оба образца), показали низкий уровень износа, где твердость была в пределах 51,1–61,3 HRC, что определило активное сопротивление внедрению абразива в поверхность и отсутствию схватывания из-за малой площади фактического контакта.

В паре 13 наплавка Э190Х5С7 с целью повышения твердости, как заэвтектоидная сталь, подверглась закалке при температуре 780 °С. Существенного повышения твердости не получено, износ в 3 раза превысил эталон.

Согласно классификации зарубежных авторов [5], закрытое абразивное изнашивание имеет место при попадании минерального абразива в зазор соединения. Кварцевый песок со средней прочностью на сжатие около 21 кгс/мм² (206 МПа) создает напряжения на микроучастках контакта взаимных деталей того же порядка даже при небольших нагрузках. Шаржирование в поверхность деталей приводит к дроблению структурных фаз, имеющих сопоставимую с абразивом прочность, и к образованию в местах внедрения микротрещин, которые в свою очередь при реверсивном движении способствуют выкрашиванию [19]. Происходит одновременное развитие усталостного и абразивного вида износа: $I_{\text{общ}} = I_{\text{абр}} + I_{\text{уст}}$. В работе [20] отмечено, что на снижение абразивного износа наиболее эффективно влияет увеличение твердости матрицы Fe_a и увеличение количества и твердости карбидных фаз, и в определенных пределах повышает износ. Измеряемая величина макротвердости показывает усредненное значение твердости матрицы основы и хрупких фаз.

Формирование упрочненной матрицы различными по свойствам легирующими элементами (Cr, Si, Mn, Ni, Ti, W, V, B и др.) с образованием твердых растворов внедрения и замещения является основным средством повышения износостойкости структуры в целом. Наличие твердых карбидных

фаз (Fe – C, Cr – C, Mn – C, Ti – C и др.) в структурах сплава достаточно эффективно противостоят абразивному и усталостному износу до определенного уровня динамической нагрузки, пока твердость карбидных соединений не будет сопоставима с твердостью контртела, а нагрузка не будет превышать критическую для данного типа соединения. Авторы [13, 19, 20] определяют, что оптимальное сочетание твердорастворного упрочнения с наличием карбидной фазы, способного максимально эффективно противостоят деградации поверхности, находится на границе хрупко-вязкого разрушения. Легирующие элементы, такие как Mn, Cr, W, V, Ti, входящие в состав сплава, образуют фазы внедрения при $r_c / r_m \leq 0,59$; имеющие простой тип решетки, могут также образовывать карбиды типа $(Fe, Mn)_3C$, $(Fe, Cr)_{23}C_6$ и т. п., в зависимости от температурного воздействия могут изменять фазовое состояние по законам полиморфизма, что повышает износостойкость сплава. В состав упрочняющих легирующих элементов могут входить как образующиеся твердые растворы, не создающие карбидных соединений (Si, Ni, Co), так и взаимодействующие с избыточным углеродом (Mn_3C , Cr_4C_3 , Mo_2C , TiC) [21, 22]. При упрочнении основной матрицы с высоким содержанием углерода карбидообразующими элементами необходимо учитывать образование хрупких соединений, снижающих износостойкость сплава при высоких динамических нагрузках.

Под совместимостью материалов трущейся пары понимается способность с минимальным или обусловленным износом за определенный период в заданных условиях эксплуатации сохранять конструктивные характеристики узла или механизма в целом. Совместимость связана с поддержанием положительного градиента механических свойств на поверхности трения. Взаимодействие трущейся пары передается по отдельным дискретным контактам, на которых образуется внешнее трение, зависящее от величины приложенной нагрузки. Внутреннее трение не зависит от нагрузки, и поверхность взаимодействия подповерхностных слоев непрерывна [7]. Изменение градиента механических свойств $d\sigma_x / dz$ элементов пары трения по нормали к контактирующим поверхностям, где σ_x – напряжение разрушения; z – положение координаты на нормали к поверхности трения, влияет на интенсивность изнашивания пары. Возникновение положительного градиента механических свойств по глубине при внешнем трении ($d\sigma_x / dz$) > 0, когда сдвиговые деформации концентрируются на границе раздела и при этом сохраняется целостность основы металла, является необходимым условием долговечности узла и цепи в целом. Обеспечение положительного градиента на поверхности твердо-

го тела трения можно достичь условиями контактной прочности пары (что в свою очередь обеспечивается механическими свойствами) либо при разупрочняющем действии высоких контактных температур созданием промежуточной прослойки в виде «третьего тела». При нарушении условий происходит смена вектора градиента на отрицательное направление ($d\sigma_x/dz < 0$, что сопровождается схватыванием, глубинным вырыванием (когезионным отрывом) материала [7, 23]. Оценка совместимости сталей и сплавов происходит по предельно допустимым нагрузкам, температурам в зоне контакта, скоростям взаимного перемещения, превышение которых ведет к схватыванию и вырыванию.

В узле шарнирного соединения сочетаются различные виды износа, и в зависимости от разрабатываемого типа грунта будет изменяться характер износа. Наличие абразивной прослойки в паре трения создает эффект «третьего тела», но при высоких давлениях деградирующий поверхностный слой термозависимых структур (например, феррито-перлитных) будет интенсивно деформироваться и шаржироваться дробленным минеральным абразивом, сопровождаться микрорезанием и разрушением нижележащих слоев глубинным вырыванием.

Совместимость пары можно определить снятием фрикционно-износных характеристик или расчетным путем [23]. Несовместимые пары, согласно результатам экспериментов, имеют феррито-перлитную структуру (пара 9) и феррито-перлитную и перлитно-карбидную (пара 6). Склонность к образованию и развитию трещин наплавки Э190Х5С7 при знакопеременных тангенциальных нагрузках создает дополнительный очаг разрушения поверхностного слоя даже при положительном градиенте механических свойств.

Высокая твердость (50–60 HRC) поверхности цементованного слоя образцов в сочетании с разными материалами, препятствующая глубокому внедрению абразивных частиц, и образование

«третьего тела» из абразива создают положительный градиент для цементованного поверхностного слоя с неустойчивым фрикционным контактом и высокую износостойкость структуры.

Восстановление пальца наплавочными материалами является перспективным методом ремонта узла, где толщина восстановленного слоя (5–10 мм) соответствует максимально допустимому износу детали и согласно средним нормам составляет 15 % от диаметра соединения. Изношенные пальцы можно многократно использовать, что снижает металлоемкость ремонта.

Выводы

1. Износостойкость взаимозависима от структур пары трения и имеет прочностную основу.
2. Определить фактическую совместимость пары трения можно только в условиях, максимально моделирующих реальный контакт на образцах, или в натуральных условиях.
3. Высокая твердость поверхности трения эффективна в пределах 50–60 HRC (пары 4, 7, 8, 11, 13).
4. Замечена низкая износостойкость наплавки Э190Х5С7 при высоких динамических нагрузках и высокой твердости контрообразца (пары 6–8, 11, 13).
5. Наплавка Э190Х5С7 демонстрирует удовлетворительный результат в паре, имеющей аустенитную пластичную структуру (пара 5).
6. Наблюдается неудовлетворительный показатель износа у пары 9 с феррито-перлитными структурами обоих образцов.
7. Диффузионное упрочнение матрицы Fe_n углеродом (цементация) с последующей термообработкой до твердости 50–60 HRC повышает износостойкость пары.
8. Пары 3, 10, 12 рекомендованы для эксплуатационных испытаний.
9. Сталь 35 и наплавка проволокой Св-08А, электродами Э46 (АНО4), прошедшие химико-термическую обработку, могут заменить средне- и высоколегированные стали деталей узла цепи.

Список источников

1. Дедикова Т. Н., Бухарицин П. И. Экологическое состояние реки Волги // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2010. № 1 (49). С. 85–87.
2. Волго-Каспийский морской судоходный канал углубят до конца года. 2023. URL: <https://ast-news.ru/node/volgo-kaspiyskiy-morskoy-sudokhodnyy-kanal-uglubyat-do-kontsa-goda> (дата обращения: 06.03.2023).
3. Tylczak J. H. Abrasive wear // ASM Handbook. Materials Park, OH, ASM International. 1992. N. 18. P. 184–190.
4. Hawk J. A., Wilson R. D., Catrpillar M. T. Abrasive wear failures // ASM Handbook. Materials Park, OH, ASM International. 2002. N. 11. P. 906–921.
5. Zum Gahr K.-H. Wear by hard particles // Tribology International. 1988. N. 10 (31). P. 587–596.
6. Картышов А. В., Пенкин Н. С., Погодаев Л. И. Износостойкость деталей земснарядов. Л.: Машиностроение, 1972. 160 с.
7. Крагельский И. В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
8. ГОСТ 23.225-99. Обеспечение износостойкости изделий. Методы подтверждения износостойкости. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2005. 19 с.
9. Донских Д. Ф., Погодаев Л. И. Способы повышения надежности шарнирного соединения черпаковой цепи дноуглубительных земснарядов // Трение, износ, смазка. 2010. Т. 13. № 44. С. 15–27.
10. Бессмертный Д. Э. Повышение работоспособности черпаковой цепи дноуглубительных земснарядов на

основе выбора материалов при изготовлении сменно-запасных деталей в судоремонте: дис. ... канд. техн. наук. Н. Новгород, 2006. 180 с.

11. Сорокин Г. М. Трибология сталей и сплавов. М.: Недра, 2000. 317 с.

12. Петровский В. А., Рубан А. Р. Исследование износостойкости пар трения из стали при высоких контактных давлениях в водно-абразивной среде // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2019. № 4. С. 23–29.

13. Цветков Ю. Н., Погодаев Л. И. Напряженное состояние металлов при изнашивающем воздействии абразива. СПб.: ИИЦ СПГУВК, 2004. 94 с.

14. Сорокин Г. М., Малышев В. Н. Аспекты металловедения в природе механического изнашивания // Трение и износ. 2005. Т. 26. № 6. С. 598–607.

15. Погодаев Л. И., Кузьмин Н. В. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин. СПб.: Изд-во Акад. трансп. РФ, 2006. 608 с.

16. Погодаев Л. И., Шевченко П. А. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования. Л.: Судостроение, 1984. 264 с.

17. Пат. РФ № 186030, МПК G01N 3/56. Машина трения / Рубан А. Р., Петровский В. А., Чанчиков В. А.; заявл. 30.07.2018; опубл. 26.12. 2018.

18. Марочник сталей и сплавов / под ред. В. Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.

19. Хрущев М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 252 с.

20. Хрущев М. М., Бабичев М. А. Износостойкость и структура твердых наплавов. М.: Машиностроение, 1971. 95 с.

21. Гуляев А. П. Металловедение. М.: Metallurgia, 1997. 646 с.

22. Лившиц Б. Г. Металлография. М.: Metallurgia, 1990. 236 с.

23. Шведков Е. Л., Ровинский Д. Я., Зозуля В. Д., Браун Э. Д. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев: Наукова думка, 1979. 187 с.

References

1. Dedikova T. N., Bukharitsin P. I. Ekologicheskoe sostoianie reki Volgi [Ecological state of Volga River]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 1 (49), pp. 85-87.

2. *Volgo-Kaspiiskii morskoi sudokhodnyi kanal uglubiat do kontsa goda. 2023* [Volga-Caspian sea navigation channel will be deepened before the end of the year. 2023]. Available at: <https://ast-news.ru/node/volgo-kaspiyskiy-morskoy-sudokhodnyy-kanal-uglubyat-do-kontsa-goda> (accessed: 06.03.2023).

3. Tylczak J. H. Abrasive wear. ASM Handbook. *Materials Park, OH, ASM International*, 1992, no. 18, pp. 184-190.

4. Hawk J. A., Wilson R. D., Catrpillar M. T. Abrasive wear failures. ASM Handbook. *Materials Park, OH, ASM International*, 2002, no. 11, pp. 906-921.

5. Zum Gahr K.-H. Wear by hard particles. *Tribology International*, 1988, no. 10 (31), pp. 587-596.

6. Kartyshev A. V., Penkin N. S., Pogodaev L. I. *Iznosostoikost' detalei zemsniaridov* [Wear resistance of dredge parts]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 160 p.

7. Kragel'skii I. V. *Trenie i iznos* [Friction and wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 480 p.

8. GOST 23.225-99. *Obespechenie iznosostoičnosti izdelii. Metody podtverzhdeniia iznosostoičnosti. Obshchie trebovaniia* [GOST 23.225-99. Ensuring product durability. Methods for confirming wear resistance. General requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 19 p.

9. Donskikh D. F., Pogodaev L. I. Sposoby povysheniia nadezhnosti sharnirnogo soedineniia cherpakovoi tsepi dnoughlubitel'nykh zemsniaridov [Methods for improving reliability of hinged connection of scoop chain of dredgers]. *Trenie, iznos, smazka*, 2010, vol. 13, no. 44, pp. 15-27.

10. Bessmertnyi D. E. *Povyshenie rabotosposobnosti cherpakovoi tsepi dnoughlubitel'nykh zemsniaridov na osnove vybora materialov pri izgotovlenii smenno-zapasnykh detalei v sudoremonie: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving efficiency of scoop chain of dredging dredgers based on choice of materials in manufacturing spare parts in ship repair: Diss. ... Cand. Tech. Sci.]. Nizhnii Novgorod, 2006. 180 p.

11. Sorokin G. M. *Tribologiya staley i splavov* [Tribology of steels and alloys]. Moscow, Nedra Publ., 2000. 317 p.

12. Petrovskii V. A., Ruban A. R. Issledovanie iznosostoičnosti par treniia iz stali pri vysokikh kontaknykh davleniiah v vodno-abrazivnoi srede [Investigation of wear resistance of friction pairs made of steel at high contact pressures in water-abrasive medium]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaiia tekhnika i tekhnologiya*, 2019, no. 4, pp. 23-29.

13. Tsvetkov Iu. N., Pogodaev L. I. *Napriazhennoe sostoianie metallov pri iznashivaiushchem vozdeistvii abrazia* [Stress state of metals under wear action of abrasive]. Saint-Petersburg, IITs SPGUVK, 2004. 94 p.

14. Sorokin G. M., Malyshev V. N. Aspekty metallovedeniia v prirode mekhanicheskogo iznashivaniia [Aspects of metallurgy in nature of mechanical wear]. *Trenie i iznos*, 2005, vol. 26, no. 6, pp. 598-607.

15. Pogodaev L. I., Kuz'min N. V. *Strukturno-energeticheskie modeli nadezhnosti materialov i detalei mashin* [Structural and energy models of reliability of materials and machine parts]. Saint-Petersburg, Izd-vo Akademii transporta RF, 2006. 608 p.

16. Pogodaev L. I., Shevchenko P. A. *Gidroabrazivnyi i kavitatsionnyi iznos sudovogo oborudovaniia* [Hydroabrasive and cavitation wear of ship equipment]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1984. 264 p.

17. Ruban A. R., Petrovskii V. A., Chanchikov V. A. *Mashina treniia* [Friction machine]. Patent RF, no. 186030, 26.12. 2018.

18. *Marochnik staley i splavov* [Grader of steels and alloys]. Pod redaktsiei V. G. Sorokina. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 640 p.

19. Khrushchev M. M., Babichev M. A. *Abrazivnoe iznashivanie* [Abrasive wear]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 252 p.

20. Khrushchev M. M., Babichev M. A. *Iznosostoičnost' i struktura tverdyykh naplavok* [Wear resistance and structure of hard surfacings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 95 p.

21. Guliaev A. P. *Metallovedenie* [Physical metallurgy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1997. 646 p.

22. Livshits B. G. *Metallografiia* [Metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990. 236 p.

23. Shvedkov E. L., Rovinskii D. Ia., Zozulia V. D., Braun E. D. *Slovar'-spravochnik po treniiu, iznosu i smazke*

detalei mashin [Dictionary-reference book on friction, wear and lubrication of machine parts]. Kiev, Naukova dumka Publ, 1979. 187 p.

Статья поступила в редакцию 17.04.2023; одобрена после рецензирования 06.06.2023; принята к публикации 04.08.2023
The article was submitted 17.04.2023; approved after reviewing 06.06.2023; accepted for publication 04.08.2023

Информация об авторах / Information about the authors

Валерий Александрович Петровский – старший преподаватель кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; Астраханский государственный технический университет; v_a_petrovsky@mail.ru

Valeri A. Petrovsky – Senior Lecturer of the Department of Shipbuilding and Power Complex of Maritime Technics; Astrakhan State Technical University; v_a_petrovsky@mail.ru

Анатолий Рашидович Рубан – кандидат технических наук, доцент; профессор кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; Астраханский государственный технический университет; a.ruban1974@mail.ru

Anatoliy R. Ruban – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of Shipbuilding and Power Complex of Maritime Technics; Astrakhan State Technical University; a.ruban1974@mail.ru

Татьяна Владимировна Хоменко – доктор технических наук, доцент; заведующий кафедрой автоматизированных систем обработки информации и управления; Астраханский государственный технический университет; t_v_khomenko@mail.ru

Tatyana V. Khomenko – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Automated Information Processing and Management Systems; Astrakhan State Technical University; t_v_khomenko@mail.ru

Александр Викторович Мельников – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры аквакультуры и рыболовства; Астраханский государственный технический университет; alex_meln@list.ru

Alexander Viktorovich Melnikov – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Aquaculture and Fisheries; Astrakhan State Technical University; alex_meln@list.ru

