

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПАР ТРЕНИЯ ИЗ СТАЛИ ПРИ ВЫСОКИХ КОНТАКТНЫХ ДАВЛЕНИЯХ В ВОДНО-АБРАЗИВНОЙ СРЕДЕ

В. А. Петровский, А. Р. Рубан

*Астраханский государственный технический университет
Астрахань, Российская Федерация*

Рабочий ресурс черпаковой цепи земснаряда в значительной степени зависит от работоспособности и надёжности шарнирного соединения, в конструктивный зазор которого попадает минеральный абразив, что при высоких динамических нагрузках приводит к повышенному износу соединения. Разработана научно-обоснованная технология ремонта деталей узла, без снижения ресурса, из дешёвых и доступных (недефицитных) материалов, с учётом современных технико-экономических требований, на образцах. Определена износостойкость образцов пары трения в условиях, моделирующих рабочий процесс цепи. Метод исследования основан на сравнении скорости изнашивания (износа) образцов в паре, изготовленных из стали 110Г13Л (втулка – палец) и сталей 110Г13Л, 38ХН3МА (втулка – палец) по заводским технологиям и принятых за эталон, с парами из стали 110Г13Л, 45, наплавкой проволокой СВ08А, электродами Э50А–УОНИ 13/55, Э–190Х5С7–ЛЭЗ–Т–590–НГ после термообработки, химико-термической обработки, поверхностно-пластического деформирования. Испытания образцов проводились в водно-абразивной среде с нагрузкой 6 615 Н (675 кг·с). Определены параметры износостойкости: 1) эталонных пар из стали 110Г13Л (втулка – палец) и 110Г13Л (втулка), 38ХН3МА (палец); 2) пары из стали 110Г13Л (втулка) и наплавки проволокой СВ08А (палец); 3) пары из стали 110Г13Л (втулка) и наплавкой электродами Э–190Х5С7–ЛЭЗ–Т–590–НГ (палец); 4) пары из стали 45 (втулка) и наплавкой электродами Э–190Х5С7–ЛЭЗ–Т–590–НГ (палец); 5) пары из стали 45 (втулка) и наплавкой электродами Э50А–УОНИ 13/55 (палец). Построен график зависимости износа втулки и пальца от отношений начальных твёрдостей и структур пары трения. Рекомендовано восстановление пальца износостойкими электродами Э–190Х5С7–ЛЭЗ–Т–590–НГ в паре с втулкой из стали 110Г13Л с поверхностно-пластическим деформированием. Износостойкость пары (при различном сочетании типов структур) не зависит от соотношения твёрдостей $H_{вт} / H_{пал}$. Материалы пары, представившие износ в пределах эталонных образцов, можно рекомендовать к эксплуатационным испытаниям.

Ключевые слова: земснаряд, черпаковая цепь, палец – втулка, износ, износостойкость, испытания на износ.

Для цитирования: *Петровский В. А., Рубан А. Р.* Исследование износостойкости пар трения из стали при высоких контактных давлениях в водно-абразивной среде // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 4. С. 23–29. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-4-23-29.

Введение

Проблемы дноуглубления всего Волжского бассейна актуальны и сегодня. Правительство РФ обеспокоено не только вопросами снижения глубины судоходных каналов и фарватеров рек на всём протяжении из-за уменьшения уровня воды, но и экологической обстановкой в дельте Астраханской области [1, 2].

В настоящее время в структуре служебно-вспомогательного флота Астраханской области состоят четыре земснаряда, из которых фактически проводят дноуглубительные работы два земснаряда.

В акваториях России черпаковые земснаряды используются для разработки различных групп грунта, в том числе недоступных для других типов земснарядов, а также при большой дальности отвода грунта, добычи полезных ископаемых из подводных карьеров. Эксплуатация черпакового земснаряда на грунтах II–VII групп по трудности разработки сопровождается повышенным износом рабочих частей ковша и шарнирного соединения черпаковой цепи вследствие высоких динамических нагрузок и попадания твёрдых абразивных частиц, в том числе продуктов разрушения поверхности, в зазор узла.

Мировая практика подтверждает, что расходы, относящиеся к последствиям механического износа [3], составляют 1–4 % национального продукта для развитых стран. В справочной литературе [4] приводятся данные о 55 % потерь металла (от общей потери металла), связанных с механическими разрушениями трущихся поверхностей.

Обзор и анализ источников [5–7] по ремонту и восстановлению сменно-запасных частей многочерпакового земснаряда подтвердил, что заменяемые детали шарнирного соединения, изготовленные или восстановленные по альтернативным технологиям, проходят ресурсные испытания непосредственно в условиях навигации, т. е. являются натурными. Отсутствуют этапы предварительных испытаний для своевременного получения характеристик износостойкости пары.

Материалы исследования

Существующее при конструировании узла черпаковой цепи известное соотношение $H_{вт} / H_{нал} = 1,4$ [6, 8] при изготовлении и эксплуатации не соблюдается и не может являться надёжным критерием оценки долговечности узла соединения.

Наличие абразива в зазоре соединения классифицируется зарубежными авторами [9] как закрытое абразивное изнашивание (closed abrasion), под абразивом понимается не только минеральные частицы, но и продукты деградации поверхности трения. По российской классификации процессы разрушения поверхности в исследуемом узле можно определить как сложный вид износа, где сочетаются процессы усталостного износа, абразивного микрорезания и схватывания, как преобладающего. В зависимости от группы грунта процессы могут доминировать, самым агрессивным является процесс с высокой составляющей абразивного материала в зазоре [6, 10].

Научная новизна заключается в получении результатов испытаний на трение с абразивной прослойкой в условиях, приближенных к эксплуатационным. При этом ставится под сомнение целесообразность применяемых в конструкции узла материалов, а также рекомендованное соотношение $H_{вт} / H_{нал} = 1,4$ для узла соединения.

Разработка альтернативной технологии (взамен существующей) изготовления пары трения узла, снижающей износ втулки (кольца) до минимально возможного, с заменой изношенного пальца на восстановленный, новый, является актуальной не только при ремонте вне навигации, но и в период эксплуатации.

Актуальность темы не ограничена только дноуглубительными работами. Подобные проблемы возникают там, где в зазор соединения по конструктивным или эксплуатационным нормам возможно попадание минерального абразива и образование твёрдых частиц износа. Это карьерные роторные экскаваторы, драги, землеройная многоковшовая техника, гусеничное соединение траков.

В настоящее время детали шарнирного соединения черпаковой цепи серийно производят из сталей 30ХГСА, 38ХНЗМА, 40ХН2, 50ХГФ, 60С2, 110Г13Л и др. с разной термообработкой. Проводились эксперименты с заменой деталей узла [5–7] на стали с термообработкой 30ХНЗМ, 37ХНЗА, 40, 40ХН2, 45, 35ХНЗ, Ст5, Ст6, графитизированную сталь, Г13ХЗЛ, Г13ТЛ, Г13Ф2Л, чугун ВЧШГ. Применяли стали 18ХГТ, 20Х с цементацией и закалкой, сталь 45, Ст5 с электролитным борированием и закалкой, экспериментировали с износостойкими наплавками электродами Т620, 12АН/ЛИВТ. Ресурс узла повышался у большинства испытанных пар, однако в силу различных причин широкого применения вышеуказанные материалы и технологии не получили.

Согласно [11] ресурс подшипникового узла скольжения определяется выражением

$$L = [h] - e / (I_{h1}s_1 - I_{h2}s_2)n,$$

где L – ресурс (долговечность) узла; $[h]$ – предельно допустимый износ; e – первоначальный зазор в узле; I_{h1}, I_{h2} – среднее значение интенсивности изнашивания материала вала – втулки; s_1, s_2 – путь трения скольжения вала и втулки за один цикл подвижного элемента; n – число циклов.

Интенсивность изнашивания является функцией износа, который зависит от сочетания прочностных показателей сплавов $\sigma_b, \sigma_t, HB, \tau$, усталостной характеристики t , показателей пластичности α (ударная вязкость), ψ (относительное сужение) трущейся пары.

Прогнозирование долговечности (ресурса) различных по структуре сталей и сплавов, используемых в узле, было рассмотрено в работе [7], где за основу качественного поведения (критериев разрушения) материала взяты энергетические критерии: Wc – предельная удельная энергия деформации, МДж/м³; $Pc\epsilon$ – относительная твёрдость. Сложность предварительных расчётов и отсутствие в специальной литературе необходимых характеристик исследуемых в настоящей работе сталей не позволяет провести даже приблизительную оценку ресурса соединения.

Постановка задачи

Основной задачей исследовательских работ является определение научно обоснованной технологии ремонта и изготовления деталей узла соединения цепи, с учётом возможностей судоремонтных предприятий Астраханской области и других заинтересованных регионов и организаций.

Технология восстановления в современных условиях должна удовлетворять основным технико-экономическим условиям: дешевизна и доступность материала; простота метода восстановления; снижение трудозатрат и простоев в ремонте.

Одной из тактических задач будет определение износостойкости пары трения в условиях, близких к эксплуатационным: высокие динамические нагрузки; наличие водно-абразивной прослойки в зазоре; невысокие относительные скорости взаимного перемещения и характер движения.

Методы исследования

Для реализации технической части поставленных задач применён метод, основанный на сравнении весового износа испытываемой пары с парой, взятой за эталон.

Спроектирован и разработан испытательный стенд МТ (машина трения) для определения износостойкости материалов деталей узла соединения черпаковой цепи, который позволяет испытывать пару образцов на износ в водно-абразивной среде с широким диапазоном нагрузок на образцы. Стенд МТ работает в возвратно-вращательном режиме, где скорость перемещения подвижного образца на поверхности трения находится в пределах средних значений при повороте черпака. Конструкция и работа МТ описана в [12].

Анализируя полученный результат, проводим выбор перспективных пар трения по возможной совместимости структур материалов сталей. После проведения стендовых испытаний определяем наиболее оптимальные пары трения для установленного комплекса требований.

Методика экспериментальной части исследования состоит из этапов:

1. Из подготовленных заготовок (наплавленных и обработанных в размер) изготавливаются образцы в форме части кольца с наружным диаметром 100 мм, внутренним диаметром 80 мм, шириной $L = 10$ и 15 мм. Шероховатость поверхности $Rz 40$;
2. Образцы подвергаются различным видам термообработки: химико-термической обработке (ХТО), поверхностно-пластическому деформированию (ППД);
3. Каждый образец взвешивается с точностью до 0,0001 г, измеряется средняя твёрдость (HRB или HRC) на поверхности трения. Данные заносятся в таблицу;
4. Отобранные по парам образцы в количестве 9 пар составляют серию;
5. Образцы $h = 15$ мм крепятся к нагрузочному рычагу и считаются неподвижными (моделирующие втулку). Образцы $h = 10$ мм устанавливаются на подвижный вал (моделирующий палец), совершающий возвратно-вращательное движение с углом поворота 30° ;
6. Каждая пара совершает 1 000 циклов (3 ч 12 мин) с нагрузкой 6 615 Н (675 кг·с). В зону трения через дозатор подаются абразив (песок) порциями и вода, чтобы по контуру контакта всегда находилась переувлажнённая абразивная масса;
7. Через каждые 333 цикла (333; 667) пара взвешивается. На неподвижном образце фиксируется общая площадь контакта для изучения динамики изменения давления, линейных и массовых показателей;
8. После испытания каждый образец взвешивается и измеряется твёрдость на поверхности трения. Все средние значения полученных данных сводятся в таблицу.

Обсуждение результатов

В табл. 1 представлены пары (серии) втулка – палец до эксперимента.

Таблица 1

Материалы для испытаний

Пара	Образец (втулка/палец)	Материал	Вид упрочнения	Структура на поверхности трения
1*	Неподвижный	110Г13Л	Нагрев до 1 050 °С, вода	Аустенитная (А)
	Подвижный	38ХНЗМА	Закалка 850 °С, масло, высокий отпуск 590–600 °С	Феррито-перлитная (ФП)
2*	Неподвижный	110Г13Л	Нагрев до 1 050 °С, вода	Аустенитная (А)
	Подвижный	110Г13Л	Нагрев до 1 050 °С, вода	Аустенитная (А)

Окончание табл. 1

Пара	Образец (втулка/палец)	Материал	Вид упрочнения	Структура на поверхности трения
3	Неподвижный	110Г13Л	Нагрев до 1 050 °С, вода	Аустенитная (А)
	Подвижный	Наплавка Св08А	Цементация, закалка, низкий отпуск 160–180 °С	Перлитно-цементитная (ПЦ)
4	Неподвижный	45	Закалка 860–880 °С, вода, низкий отпуск 170–190 °С	Феррито-перлитная (ФП)
	Подвижный	Наплавка Э 50 А-УОНИ 13/55	Цементация, закалка, низкий отпуск 160–180 °С	Перлитно-цементитная (ПЦ)
5	Неподвижный	110Г13Л	Нагрев до 1 050 °С, вода + ППД	Аустенитная (А)
	Подвижный	Наплавка Э-190Х5С7	Отжиг 900 °С	Перлитно-ферритная-карбидная (ПФК)
6	Неподвижный	45	Закалка 860–880 °С, вода, низкий отпуск 170–190 °С	Феррито-перлитная (ФП)
	Подвижный	Наплавка Э-190Х5С7	Отжиг 900 °С	Перлитно-ферритная-карбидная (ПФК)

* Пары, принятые за эталон.

Пары из серии 1 и 2, где «втулка» из стали 110Г13Л и «палец» из стали 38ХНЗМА; «втулка – палец» из стали 110Г13Л, приняты за эталон. В табл. 2 представлены результаты испытаний.

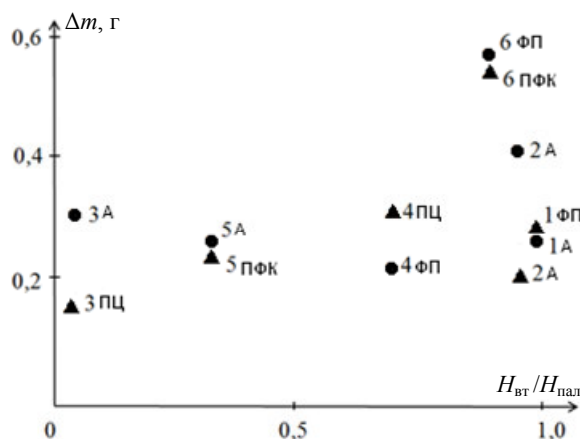
Таблица 2

Результаты испытаний

№ серии	Неподвижный образец (втулка) •				Подвижный образец (палец) ▲				$H_{вт}/H_{пал}$ до/после испытаний
	Материал	Твёрдость до/после испытаний	Износ Δm , г	Скорость изнашивания I , г/ч	Материал	Твёрдость до/после испытаний	Износ Δm , г	Скорость изнашивания I , г/ч	
1*	110Г13Л	88,2 HRB 20,5 HRC	0,2333	0,0734	38ХНЗМА	90,7 HRB 35,9 HRC	0,2409	0,0758	0,97 0,57
2*	110Г13Л	86,3 HRB 24,2 HRC	0,4010	0,1261	110Г13Л	90,0 HRB 24,3 HRC	0,1929	0,0607	0,95 1,0
3	110Г13Л	77,0 HRB 27,5 HRC	0,3026	0,0952	Св08А	55,6 HRC 60,6 HRC	0,1597	0,0502	0,05 0,45
4	45	38,9 HRC 34,8 HRC	0,2871	0,0903	Э 50 А-УОНИ 13/55	53,3 HRC 56,2 HRC	0,3242	0,1020	0,73 0,62
5	110Г13Л	92,4 HRB 17,1 HRC	0,2548	0,0802	Э-190Х5С7	46,1 HRC 43,9 HRC	0,2491	0,0784	0,33 0,39
6	45	39,5 HRC 35,2 HRC	0,5513	0,1734	Э-190Х5С7	44,4 HRC 34,1 HRC	0,5459	0,1717	0,88 1,03

* Пары, принятые за эталон.

По результатам испытаний построен график (рис.).



Влияние структур пары на износ «втулки» и «пальца» от отношений твердостей «втулки» и «пальца» (до эксперимента)

Увеличилась твёрдость стали 110Г13Л на 2–34 % у всех образцов, что характерно для этой марки с аустенитной матрицей, высоколегированной марганцем Mn, под действием высокой динамической нагрузки. Повысилась твёрдость подвижного образца из стали 38ХН3МА на 20 % также за счёт пластической деформации. Остальные образцы несущественно изменили твёрдость (см. табл. 2).

Соотношение $H_{вт} / H_{пал}$ эталонных пар (№ 1, 2) (до эксперимента) находится в пределах 1,0, что уже вызывает сомнение в целесообразности (адекватности) применения $H_{вт} / H_{пал} = 1,4$ критерия, т. к. пары приводят низкую скорость изнашивания.

Пара № 3 проиллюстрировала удовлетворительный износ неподвижного образца (втулки) из стали 110Г13Л (аустенитная структура) и более низкий (в сравнении с эталоном № 1, 2) – подвижного образца (палец) с наплавкой Св08А и цементацией (перлитно-цементитная структура), что по суммарному износу практически одинаково с эталонами. Соотношение $H_{вт} / H_{пал} = 0,05$ – самое минимальное из испытанных пар, в данном случае противоречит рекомендациям. Низкий износ подвижного образца (палец) можно объяснить высокой твёрдостью (55,6 HRC) и высокой пластичностью (77,0 HRB) аустенитной структуры контрообразца из-за отсутствия значительного (в 2 и более раз) упрочнения деформацией.

Возможно (логично) отнести рекомендации $H_{вт} / H_{пал} = 1,4$ к ряду определённых (частных) случаев, например к различным структурным классам пар трения, видам износа, что требует дополнительных исследований.

Предварительные испытания на МТ выявили, что в зоне контакта сложный вид износа обусловлен наличием повышенного количества минерального дроблёного абразива, шаржированного в поверхность трения и свободно перекатывающегося, в том числе продуктами износа.

Динамика изменения контактного давления в текущем эксперименте такова, что от первого касания образцов создаётся давление в пределах 245–294 МПа (зависит от материала), до 78–88 МПа по окончании эксперимента.

Неподвижный образец (втулка, сталь 45, феррито-перлитная структура) пары № 4 представил приемлемый результат, тогда как контрообразец (палец, наплавка УОНИ13/55, перлитно-цементитная структура) – повышенный, где изначально была высокая твёрдость 53,3 HRC против 38,9 HRC. Соотношение $H_{вт} / H_{пал} = 0,73$. Шаржируемый в более мягкий образец дроблёный минеральный абразив повышает износ более твёрдого контрообразца, что подтверждает пара № 6, где $H_{вт} / H_{пал} = 0,88$ с твёрдостью 39,5 HRC и 44,4 HRC соответственно и где получен самый высокий износ (втулка – 0,5513 г, палец – 0,5459 г). Низкие показатели пластичности поверхностных слоев обоих образцов (втулка – феррито-перлитная структура, палец – перлитно-ферритная карбидная структура) и невысокая твёрдость при трении с абразивной прослойкой создают условия для повышенного износа. Химический анализ стружки наплавки Э-190Х5С7 выявил заниженные показатели: С – 0,628 %; Si – 5,35 %; Cr – 5,1 % против заявленных. Макроструктурный анализ доказал наличие микротрещин на поверхности наплавки, которые также можно отнести к факторам, усиливающим деградацию поверхности трения.

Приемлемые показатели износа у пары № 5 (втулка, сталь 110Г13Л + ППД, аустенитная структура; палец, наплавка Э-190Х5С7, перлитно-ферритная карбидная структура). Соотношение $H_{вт} / H_{пал} = 0,33$. Высокая пластичность (КСУ 260 – 350 Дж/см²) [8] аустенитной структуры при отсутствии упрочнения (92,4 HRB) от ударных нагрузок и относительно высокая твёрдость контрообразца (палец) (46,1 HRC) по скорости изнашивания сопоставимы с эталонной парой № 1.

Выводы

1. Определены совместимые пары, проиллюстрировавшие износ меньше или в пределах эталонных образцов: это пары № 3–5.

2. Сопоставимый результат с эталоном № 1 представила пара № 5. При восстановлении пальца из стали 38ХН3МА рекомендовано проводить ремонт износостойкими электродами Э-190Х5С7 с отжигом для механической обработки в размер.

3. Износостойкость одного образца зависит от структуры контрообразца при соответствующей термообработке (пары {1; 2}, {5; 6}, {3; 5}) и не зависит от соотношения твёрдостей $H_{вт} / H_{пал}$ (пары № 1, 5).

4. Оценить износостойкость $I = f(H_{вт} / H_{пал})$ конкретного материала в паре с другим можно только в пределах такой же структуры (независимо от химсостава) контртела при одинаковых условиях испытаний или эксплуатации.

5. Для определения границ совместимости структур пар трения исследуемых и перспективных материалов, в зависимости от технологии изготовления и восстановления, необходимо продолжить эксперименты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурдин К. Волге вернут глубину // Аргументы недели. 2010. № 43 (233). URL: <http://argumenti.ru/economics/n262/82544?typelink=openlink/> (дата обращения: 12.07.2019).
2. Проблему дноуглубительных работ на Каспии обсудили в Москве. URL: <http://astravolga.ru/problemu-dnouglubitelnykh-rabot-na-kaspii-obsudili-v-moskvet/> (дата обращения: 10.11.2016).
3. Tyleczak 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. Донских Д. Ф., Погодаев Л. И. Способы повышения надёжности шарнирного соединения черпаковой цепи дноуглубительных земснарядов // Трение, износ, смазка. 2010. Т. 13. № 44. С. 15–27.
6. Картышов А. В. Износостойкость деталей земснарядов. Л.: Машиностроение, 1972. 160 с.
7. Бессмертный Д. Э. Повышение работоспособности черпаковой цепи дноуглубительных земснарядов на основе выбора материалов при изготовлении сменно-запасных деталей в судоремонте: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Н. Новгород, 2006. 22 с.
8. Хрущёв М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 252 с.
9. Zum Gahr K.-H. Wear by hard particles // Tribology International. 1988. Vol. 31. N. 10. P. 587–596.
10. Крагельский И. В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
11. Дроздов Ю. Н., Павлов В. Г., Пучков Н. В. Трение и износ в экстремальных условиях. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
12. Пат. РФ № 186030. Формула полезной модели / Рубан А. Р., Петровский В. А., Чанчиков В. А.; опубл. 26.12.2018.

Статья поступила в редакцию 16.07.2019

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петровский Валерий Александрович – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; старший преподаватель кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; v_a_petrovsky@mail.ru.

Рубан Анатолий Рашидович – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук, доцент; зав. кафедрой судостроения и энергетических комплексов морской техники; a.ruban1974@mail.ru.



STUDYING WEAR RESISTANCE OF STEEL FRICTION PAIRS UNDER HIGH CONTACT PRESSURE IN WATER-ABRASIVE MEDIUM

V. A. Petrovsky, A. R. Ruban

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation*

Abstract. The paper is focused on the problem of the service life of the dredger chain, which largely depends on the efficiency and reliability of the hinge joint, when a mineral abrasive gets into the structural gap resulting in rapid wear of the joint under high dynamic loads. There has been developed a science-based technology of repairing parts of the assembly, without reducing the resource, from cheap and accessible (non-deficient) materials, taking into account modern technical and economic requirements, on samples. Wear resistance of samples of friction pairs has been defined in terms of a chain operating model. The research method is based on comparing the wear rate of samples in a pair made of steel 110Mn13 (sleeve - pin), 110Mn13 and 38CrNi3M (sleeve - pin), according to the standard technologies and taken as a reference, with pairs made of steel 110Mn13, C45K, facing with wire SV08A, electrodes E50A – UONI 13/55 and E – 190Cr5Si7 – LEZ – T – 590 – NG after heat treatment, chemical and heat treatment, surface plastic deformation. Samples were tested in the water-abrasive environment with a load of 6615 N (675 kgf). The wear

resistance parameters were determined as following: 1) reference pairs of steel 110Mn13 (bushing-pin) and 110Mn13 (bushing), 38CrNi3Mo (pin); 2) pairs of steel 110Mn13 (bushing) and facing with wire SV08A (pin); 3) pairs of steel 110Mn13 (bushing) and cladding with electrodes E-190Cr5Si7-LEZ-T-590-NG (pin); 4) pairs of steel C45K (bushing) and cladding with E-190Cr5Si7-LEZ-T-590-NG electrodes (pin); 5) pairs of steel C45K (bushing) and cladding with E50A-UONI 13/55 electrodes (pin). A graph of dependence of the bushing and pin wear on the relations of initial hardness and structures of friction pair has been built. It is recommended to restore the pin with wear-resistant electrodes E-190Cr5Si7-LEZ-T-590-NG paired with 110Mn13 steel bushing with surface plastic deformation. The wear resistance of a pair, with a different combination of structures, does not depend on the ratio of hardness of H_{sl} / H_{fin} . The materials of the pair worn within the reference samples can be recommended for the operational tests.

Key words: suction dredge, scoop chain, pin-bushing, wear, wear resistance, wear test.

For citation: Petrovsky V. A., Ruban A. R. Studying wear resistance of steel friction pairs under high contact pressure in water-abrasive medium. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2019;4:23-29. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2019-4-23-29.

REFERENCES

1. Gurdin K. Volge vernut glubinu [The Volga will be made deep again]. *Argumenty nedeli*, 2010, no. 43 (233). Available at: <http://argumenti.ru/economics/n262/82544?typelink=openlink/> (accessed: 12.07.2019).
2. *Problemu dnouglubitel'nyh rabot na Kaspii obsudili v Moskve* [Dredging problem of the Caspian was discussed in Moscow]. Available at: <http://astravolga.ru/problemu-dnouglubitelnyx-rabot-na-kaspii-obsudili-v-moskvet/> (accessed: 10.11.2016).
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. Donskih D. F., Pogodaev L. I. Sposoby povysheniya nadyozhnosti sharnirnogo soedineniya cherpakovoy cepi dnouglubitel'nyh zemsnyaryadov [Ways to increase reliability of scoop chain joint of dredging dredgers]. *Trenie, iznos, smazka*, 2010, vol. 13, no. 44, pp. 15-27.
6. Kartyshov A. V. *Iznosostojkost' detalej zemsnyaryadov* [Wear resistance of dredger parts]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 160 p.
7. Bessmertnyj D. E. *Povyshenie rabotosposobnosti cherpakovoy cepi dnouglubitel'nyh zemsnyaryadov na osnove vybora materialov pri izgotovlenii smenno-zapasnyh detalej v sudoremonte: avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving performance of scoop chain of dredgers based on choice of materials in manufacture of replaceable parts in ship repair: diss. abstr. cand. tech. sci.]. Nizhnij Novgorod, 2006. 22 p.
8. Hrushchyov M. M., Babichev M. A. *Abrazivnoe iznashivanie* [Abrasive wear]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 252 p.
9. Zum Gahr K.-H. Wear by hard particles. *Tribology International*, 1988, vol. 31, no. 10, pp. 587-596.
10. Kragel'skij I. V. *Trenie i iznos* [Friction and wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 480 p.
11. Drozdov Yu. N., Pavlov V. G., Puchkov N. V. *Trenie i iznos v ekstremal'nyh usloviyah* [Friction and wear in extremesituations]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 224 p.
12. Ruban A. R., Petrovskij V. A., Chanchikov V. A. *Formula poleznoj modeli* [Formula of utility model]. Patent RF, no. 186030, 26.12.2018.

The article submitted to the editors 16.07.2019

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrovsky Valery Alexandrovich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Senior Lecturer of the Department of Shipbuilding and Power Engineering Complexes; v_a_petrovsky@mail.ru.

Ruban Anatoliy Rashidovich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Shipbuilding and Power Engineering Complexes; a.ruban1974@mail.ru.

