УДК 621.797

УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТРЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Леонтьев Л.Б., Шапкин Н.П., Леонтьев А.Л., Шкуратов А.Л.

ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, e-mail: rectorat@dvfu.ru

В настоящей работе приведены перспективные минеральные и органоминеральные композиции для получения износостойких покрытий на хромированной поверхности плунжерных пар из стали ХВГ. Были исследованы следующие материалы и композиции: серпентинит; природный алюмосиликат; кварцевая пыль; природный алюмосиликат, модифицированный полисахаридом; природный алюмосиликат, модифицированный полисахаридом, плюс серпентинит. Представлена схема поиска оптимального химического состава минеральных и органоминеральных материалов для упрочнения хромового покрытия. Испытания проводили в интервале нагрузок от 100 до 500 Н. Установлено, что модифицирование гальванического хромового покрытия уменьшает скорость изнашивания, которая зависит от состава модификатора. При использовании природного алюмосиликата наблюдается минимальный износ (28,4%), в то время как при использовании серпентинита износ достигает 31,4%. Наибольшее уменьшение температуры наблюдается при обработке природным алюмосиликатом, модифицированным природным полисахаридом. Наиболее низкий коэффициент трения во всем интервале нагрузок наблюдается при модифицировании хрома серпентинитом. Упрочнение хромированной поверхности композицией, содержащей 90% серпентинита и 10% природного алюмосиликата, модифицированного природным полисахаридом, увеличивает износостойкость хромированной поверхности более чем в восемь раз. Суммарная скорость изнашивания сопряжения уменьшается в 6,3 раза.

Ключевые слова: надежность, износостойкость, покрытие, минеральные и органоминеральные материалы, технология

THE CONTROL OF FORMING OF COMPOSITIONAL WEAR RESISTANCE, METAL-CERAMIC COATINGS ON THE SURFACES OF FRICTION OF DETAILS

Leontev L.B., Shapkin N.P., Leontev A.L., Shkuratov A.L.

FGAOU VPO «Far Eastern national University», Vladivostok, e-mail: rectorat@dvfu.ru

In this work optimal thribotechnical compositions for obtaining of wear resistance coating on the chromium surface of plunger pares and steel HVG were developed. The definite composition: serpentinate; natural silicate; quarts dust; natural silicate, modified by natural polysaccharide; natural silicate, modified by natural polysaccharide, plus serpentinate, were investigated. It was given scheme of analysis of optimal chemical content of inorganomineral and organometalmineral materials for strengthening of chromium coating. The examinations of friction details in standard conditions in the interval of loading 100–500 N were defined. The modification of surface of chromium coating decrease wear resistance and depend at content of modificator. Minimal wear (28,4%) was observed at using of natural silicate, however at using of serpentinate wear obtained 31,4%. More decreasing of temperature was observed at using of natural silicate, modified by natural polysaccharide, and more decreasing coefficient of friction was observed in all interval of loading. The hardening of chromium surface by composition containing 90% of serpentinate and 10% of natural silicate, modified by natural polysaccharide, at increasing of loading (40 N/mm) and at time of treatment in during on minute for every loading. The above composition increase the wear resistance of chromium surface more than eight times. The obtaining of compositional coating on the steal HVG allow to decrease the rate of wear of chromium and layer of HVG in six times. The summary rate of wear of conjugating was decreased in 6,3 times.

Keywords: reliability, durability, coverage, mineral and organic-mineral materials, technology

В настоящее время повышение надежности машин, механизмов и оборудования представляет собой актуальную проблему, которая обусловлена экономическими факторами. Известно, что на обеспечение надежности трибосопряжений технически развитые страны расходуют от 3 до 5% годовых бюджетных средств. Анализ отказов деталей и оборудования в целом на водном транспорте показал, что до 85% отказов вызвано процессами трения и изнашивания [4].

Повышение надежности машин, механизмов и оборудования возможно при решении следующих технологических задач: разработки современных износостойких и антифрикционных материалов, выбора оптимального сочетания материалов для конкретных условий работы трибосопряжений и разработки оптимальной технологии нанесения износостойкого или антифрикционного покрытия на деталь или трибосопряжение.

Наиболее широкое распространение при восстановлении и упрочнении большой номенклатуры деталей получило пористое хромирование благодаря удовлетворительной прирабатываемости к сопряженным нехромированным поверхностям, низкому коэффициенту трения пары «пористый хром – сталь», высокой твердости и износостойкости при повышенных давлениях и температуре в коррозионных средах. Однако хромовые покрытия не обеспечивают необходимую износостойкость при наличии

абразива в смазке (например, топливная аппаратура судовых дизелей, работающих на тяжелом топливе, системы гидравлики приводов механизмов и устройств спецтехники и др.) [2].

Повысить износостойкость трибоузлов и, соответственно, их надежность наиболее целесообразно нанесением композиционных покрытий: гальваническим хромированием с последующим модифицированием минеральными или органоминеральными материалами [3–5].

Цель исследования — повышение надежности машин, механизмов и оборудования путем разработки технологии формирования композиционных износостойких металлокерамических покрытий на поверхностях трения деталей.

Материалы и методы исследования

Поиск оптимального химического состава минеральных и органоминеральных материалов для упрочнения хромового покрытия плунжера для решения задачи повышения долговечности плунжерных пар путем получения износостойких композиционных покрытий осуществлялось в соответствии с блок-схемой (рис. 1).

Для определения оптимальной триботехнической композиции для модифицирования стали ХВГ и хромового покрытия были выбраны следующие вещества и композиции:

1) серпентинит (брутто-формула:

$$Mg \cdot Fe_{0,8} \cdot Al_{0,4} \cdot Si_{2,1}O_9 \cdot H_2O \cdot (CaSiO_3)_{0,9});$$

2) алюмосиликат природного происхождения (брутто-формула:

$$Mg \cdot Fe_{0,8} \cdot Al_{0,4} \cdot Si_{2,1}O_9 \cdot H_2O \cdot (CaSiO_3)_{0,9});$$

3) кварцевая пыль (Si_2O);

4) природный алюмосиликат, модифицированный полисахаридом природного происхождения (брутто-формула полисахарида: $(C_6O_4H_7NH_2)_n$);

5) серпентинит + природный алюмосиликат;

6) природный алюмосиликат, модифицированный полисахаридом природного происхождения, + серпентинит.

Для триботехнических испытаний образцы изготавливали из стали ХВГ в форме роликов диаметром 45 мм, шириной 10 мм, часть образцов покрывали хромовым покрытием. Перед проведением испытаний образцы полировали алмазной пастой до Ra = 0,063 мкм. Испытания на универсальной машине модели УМТВК проводили по схеме «ролик – ролик» в условиях граничного трения при постоянной скорости скольжения 0,628 м/с. В качестве неподвижного образца использовался ролик из стали ХВГ твердостью 60–61 HRC. Смазку пары трения осуществляли капельным способом (25–30 капель в минуту). Для смазки применялось дизельное топливо марки Л-0.5 по ГОСТ 305–82. В качестве искусственного загрязнителя использовалась кварцевая пыль дисперсностью 1–5 мкм. Концентрация загрязнителя в топливе составляла 1%. Время испытаний каждой пары трения составляло четыре часа. Нагрузка изменялась от 100 до 500 Н. В процессе испытаний фиксировали следующие параметры: интенсивность (величину) изнашивания, силу (коэффициент) трения и температуру фрикционного разогрева.

Детали и образцы хромировали в универсальном сернокислом электролите на режиме: температура электролита 50°С, плотность тока 60 А/дм^2, который обеспечивает наибольшую износостойкость хромового покрытия и оптимальную микротвердость в пределах 9120–9210 МПа. Толщина хромового покрытия составляла 12–15 мкм, которая необходима для восстановления изношенных или упрочнения новых деталей.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате сравнительных триботехнических испытаний было установлено (таблица).

Модифицирование поверхностного слоя гальванического хрома позволяет уменьшить износ покрытия и сопряженной детали, при этом величины износа существенно зависят от состава модификатора.

Износ хрома отсутствует после его упрочнения алюмосиликатом, модифицированного полисахаридом, но при этом велик износ сопряженной детали (96,1% от износа стали ХВГ при трении с неупрочненным хромом).

Минимальный износ (28,4%) наблюдается после упрочнения хрома алюмосиликатом, при этом износ сопряженной детали несколько меньше (76,5%).

Упрочнение хрома серпентинитом позволяет получить износ покрытия 31,4% при минимальном износе сопряженной детали — всего 47%.

Упрочнение хрома кварцем незначительно уменьшает его износ (с 41,2% для неупрочненного хрома до 37,2%, т.е. всего на 4%), но снижает износ сопряженной детали до 52,9%.

Модифицирование поверхности хрома уменьшает температуру в зоне фрикционного контакта. Наибольшее уменьшение температуры наблюдается при упрочнении алюмосиликатом, модифицированным полисахаридом, наименьшее – при использовании кварца во всем диапазоне нагрузок.

Коэффициент трения стабильный и самый низкий во всем диапазоне нагрузок у трибосопряжения с образцами, упрочненными серпентинитом и алюмосиликатом, модифицированным полисахаридом. Применение кварца и алюмосиликата снижает коэффициент трения в меньшей степени, причем кварц и после приработки обеспечивает уменьшение коэффициента трения при увеличении нагрузки в исследуемом диапазоне.

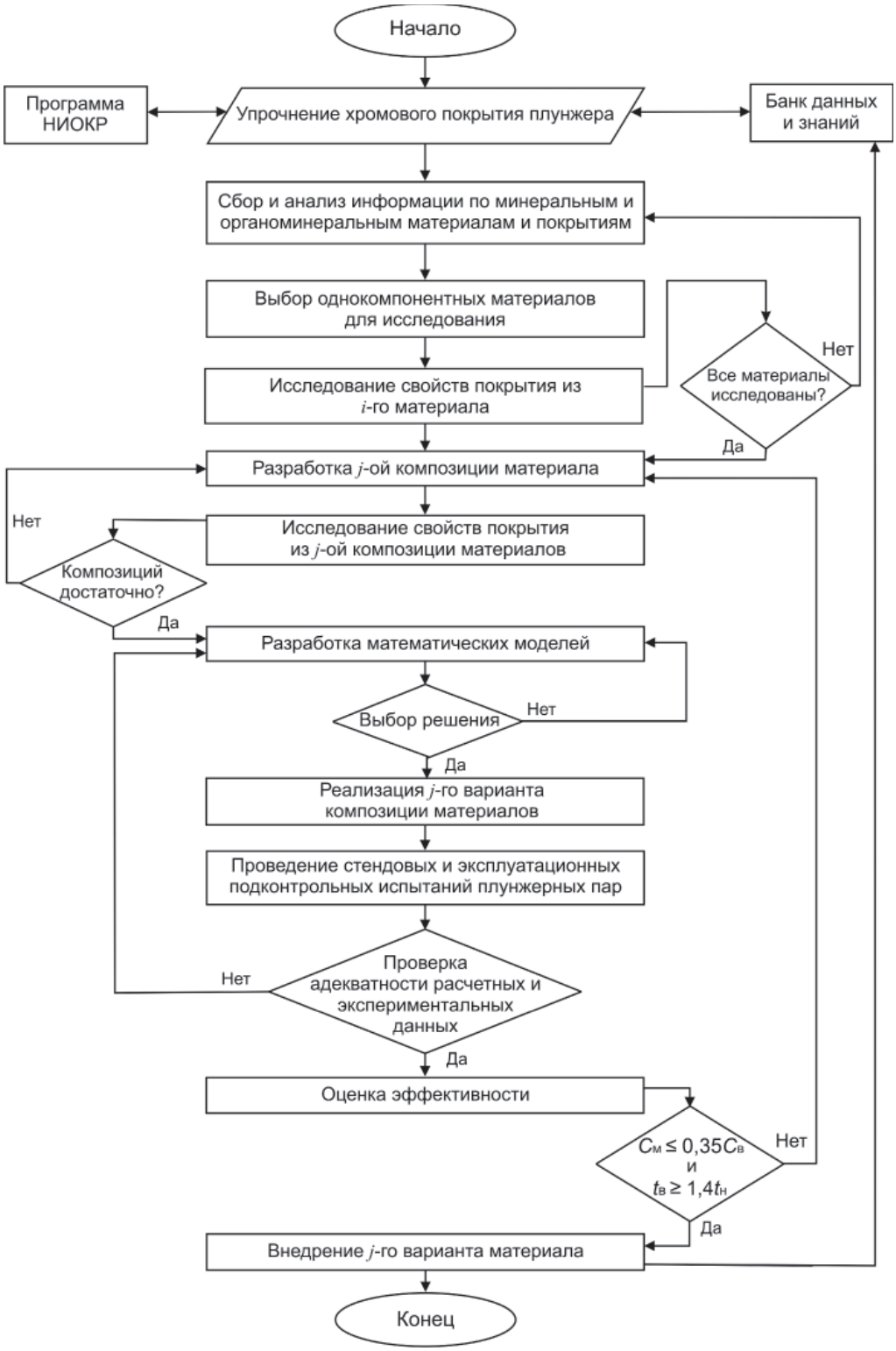

Рис. 1. Блок-схема поиска оптимального химического состава минеральных и органоминеральных материалов для упрочнения хромового покрытия

Для дальнейших исследований создавались композиции из следующих материалов: серпентинита (50% по массе) и алюмосиликата природного происхождения (50% по массе) – композиция № 5, серпентинита (50% по массе) и алюмосиликата природного происхождения, модифицированного полисахаридом природного происхождения – композиция № 6.

Результаты сравнительных триботехнических испытаний

Пара трения	Нагрузка, Н	Время испытаний, ч	t_{max}, °С	$k_{тр}$	Средняя скорость изнашивания, мг/ч	
					покрытия	ХВГ
ХВГ – хром	100	0,5	49	0,171	1,8	6,8
	200	0,5	64	0,142	1,2	5,0
	300	1,0	78	0,148	1,2	1,5
	500	2,0	110	0,174	0,8	1,4
ХВГ – хром, модифицированный составом № 1 (серпентинит)	100	0,5	42	0,113	0	0,4
	200	0,5	52	0,128	0,6	1,0
	300	1,0	64	0,128	1,3	2,5
	500	2,0	98	0,128	1,3	1,1
ХВГ – хром, модифицированный составом № 2 (алюмосиликат)	100	0,5	48	0,114	0	0,8
	200	0,5	55	0,134	0	1,8
	300	1,0	71	0,138	0	2,0
	500	2,0	105	0,166	1,5	2,2
ХВГ – хром, модифицированный составом № 3 (кварц)	100	0,5	44	0,171	1,6	1,4
	200	0,5	55	0,150	0,8	
	300	1,0	73	0,143	1,5	
	500	2,0	108	0,137	0,6	
ХВГ – хром, модифицированный композицией № 4	100	0,5	36	0,149	0	2,4
	200	0,5	50	0,129	0	
	300	1,0	60	0,133	0	
	500	2,0	95	0,125	0,2	
ХВГ – хром, модифицированный композицией № 5	100	0,5	40	0,143	0	0,6
	200	0,5	51	0,143	0,8	1,2
	300	1,0	70	0,152	0,4	1,9
	500	2,0	106	0,137	0,4	1,1
ХВГ – хром, модифицированный композицией № 6	100	0,5	38	0,156	0	0001,4
	200	0,5	51	0,143	0	
	300	1,0	63	0,133	0	
	500	2,0	98	0,125	1,1	

Минимальный суммарный износ сопряжения наблюдается при использовании композиции № 5 и составляет всего 46% от суммарного износа базового варианта сопряжения (ХВГ – Cr), причем износ модифицированного хрома составляет 38,6% от немодифицированного хрома, а стали ХВГ – 49%.

Применение композиции № 6 приводит к износу модифицированного образца только при нагрузке 500 Н. Износ неподвижного образца составляет 53,9% от износа базового варианта (ХВГ – хром).

Таким образом, получение наилучших триботехнических свойств для пар трения ХВГ–ХВГ и ХВГ–хром обеспечивают следующие минеральные и органоминеральные композиции:

– 50% серпентинит + 50% алюмосиликат (композиция № 5);

– 50% серпентинит + 50% алюмосиликат, модифицированный полисахаридом природного происхождения (композиция № 6).

Для нахождения оптимального содержания серпентинита в композициях № 5 и № 6 были проведены дополнительные испытания в течение 1 ч при нагрузке 500 Н.

Установлено, что минимальный износ покрытия и сопряженной детали из стали ХВГ наблюдается после упрочнения хромового покрытия композицией 90% серпентинита + 10% алюмосиликата, модифицированного полисахаридом, суммарная скорость изнашивания трибосопряжения всего 2,2 мг/ч. Увеличение доли алюмосиликата в композиции до 20% приводит к возрастанию суммарной скорость изнашивания до 2,5 мг/ч (на 13,6%) за счет увеличения износа как покрытия, так и стали ХВГ. При этом величина износа покрытия возрастает в 2 раза, а стали ХВГ – всего на 5%.

Затем по износостойкости следует композиция, содержащая 90% серпентинита и 10% алюмосиликата, – суммарная скорость изнашивания трибосопряжения 2,7 мг/ч. Повышение износостойкости трибосопряжения по сравнению с хромовым покрытием без упрочнения составляет 3,3 раза.

На основании исследований образования металлокерамических покрытий фрикционным методом было установлено, что основными параметрами модифицирования осадков хрома при применении фрикционного метода являются: приведенное усилие прижатия индентора к упрочняемой поверхности P и время упрочнения t. Линейная скорость упрочняемой поверхности была постоянной и составляла 0,71 м/с. Модифицирование поверхности трения минеральными и органоминеральными материалами осуществляли неподвижным индентором из серого перлитного чугуна диаметром 45 мм, который прижимался к вращающимся образцу или упрочняемой детали. Модифицирующий состав, состоящий из минерального или органоминерального материала и дизельного топлива, наносился на упрочняемую поверхность.

Установлено, что усилие прижатия индентора менее 20 Н/мм не обеспечивает качественного упрочнения. Увеличение нагрузки свыше 40 Н/мм приводит к образованию дефектов на поверхности гальванического хрома в виде рисок или язвин, а иногда и шелушению покрытия. Триботехнические испытания проводили при нагрузке 500 Н в течение 3 ч, так как при меньших нагрузках износ покрытия практически отсутствует. Предварительно образцы прирабатывались после упрочнения при нагрузке 300 Н в течение 5 мин. В качестве функций отклика были выбраны величины скорости изнашивания композиционного покрытия и стального образца.

Для получения композиционного покрытия использовали композицию 90% серпентинита + 10% алюмосиликата, модифицированного полисахаридом. В процессе триботехнических испытаний фиксировали следующие параметры: интенсивность (величину) изнашивания, силу (коэффициент) трения и температуру фрикционного разогрева.

В результате исследований получены зависимости величин скоростей изнашивания композиционного покрытия (1) и сопряженного образца из стали ХВГ (2) от параметров режима упрочнения хромового покрытия

$$V_{\text{п}} = 1{,}72 + 0{,}011t - 0{,}035P_n, \text{ мг/ч}; \quad (1)$$

$$V_{\text{н}} = 2{,}27 + 0{,}076t - 0{,}029P_n - 0{,}00125P_n t, \text{ мг/ч}. \quad (2)$$

Наибольшее влияние на скорости изнашивания покрытия и сопряженной стали ХВГ оказывает усилие прижатия индентора к упрочняемой поверхности (1 и 2). С увеличением усилия прижатия величины скоростей изнашивания уменьшаются (рис. 2). Несколько меньшее влияние на величины скоростей изнашивания оказывает время упрочнения: по мере его возрастания скорости изнашивания увеличиваются.

Оптимальным по всем триботехническим параметрам является режим упрочнения, при котором максимальное усилие прижатия индентора к упрочняемой поверхности (40 Н/мм) и минимальное время упрочнения (1 мин).

Далее проводили испытания по модифицированию хромового покрытия путем применения ступенчатого нагружения. Было установлено, что такой вид нагружения позволяет снизить скорость изнашивания покрытия после приработки вследствие более быстрого образования вторичных структур и приспособляемости поверхностей трения к условиям работы. Минимальная величина усилия составляла 10 Н/мм. Время воздействия при каждой нагрузке составляло 1 мин. Такая схема упрочнения позволила увеличить износостойкость покрытия при упрочнении на максимальной нагрузке прижатия индентора к детали в 1,4 раза (рис. 2, кривая *1*). Зависимость скорости изнашивания композиционного покрытия от максимального усилия прижатия индентора к упрочняемой поверхности имеет вид

$$V_{\text{п}} = 2{,}17 + 0{,}0006P_n^{\,2} - 0{,}073P_n, \text{ мг/ч}. \quad (3)$$

Скорость изнашивания сопряженной детали из стали ХВГ после упрочнения хромового покрытия при ступенчатом нагружении при упрочнении примерно такая же, как и при мононагружении. Температура в зоне трибоконтакта и коэффициент трения практически не зависят от вида нагружения при упрочнении.

Исследование композиционных покрытий с помощью рентгено-электронной спектроскопии позволило установить состав металлокерамической пленки на глубине до 100 нм (в атомных процентах): C = 56,23, O = 21,83, Cr = 10,89, Si = 3,78, Al = 4,93, Na = 1,78, Mn = 0,33, Fe = 0,23.

Выводы

Таким образом, упрочнение гальванического хрома композицией 90% серпентинита + 10% алюмосиликата, модифицированного полисахаридом, при ступенчатом увеличении нагрузки (максимальное усилие 40 Н/мм) и времени воздействия при каждой нагрузке в течение 1 мин позволяет повысить износостойкость хрома более

чем в 8 раз. Нанесение композиционного покрытия на оптимальном режиме позволяет также уменьшить скорость изнашивания покрытия и сопряженной детали из стали ХВГ в 6 раз. При этом суммарная скорость изнашивания сопряжения в целом уменьшается в 6,3 раза. Следовательно, долговечность сопряжения при восстановлении подвижной детали нанесением композиционного покрытия возрастет не менее чем в 6 раз по сравнению с парой трения «хром – сталь ХВГ».

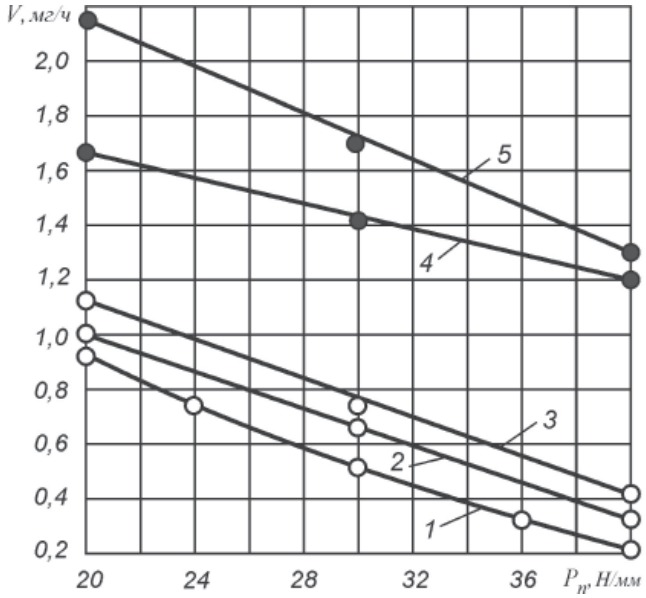

Рис. 2. Зависимость скоростей изнашивания покрытия (линии 1, 2 и 3) и сопряженного образца из стали ХВГ (линии 4 и 5) от приведенной нагрузки и времени упрочнения: 1 – ступенчатое нагружение при упрочнении с интервалом нагрузок 100 Н, время воздействия при каждой нагрузке 1 мин; 2 – 1 мин; 3 – 10 мин; 4 – 1 мин; 5 – 10 мин

Плунжерные пары с композиционными покрытиями успешно эксплуатируются на судах судоходных компаний и имеют безотказную наработку свыше 14 тыс. ч для среднеоборотных и свыше 20 тыс. ч для малооборотных дизелей, работающих на тяжелых сортах топлива.

Список литературы

1. Лазарев С.Ю. К вопросу о критериях выбора природных минеральных материалов и других веществ для покрытий разного назначения / С.Ю. Лазарев, С.Б. Токманев, В.Б. Хмелевская // Металлообработка. – 2006. – № 3 (33). – С. 29–35.

2. Леонтьев Л.Б. Технологическое обеспечение надежности судового оборудования. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2009. – 544 с.

3. Леонтьев Л.Б. Формирование износостойких покрытий на прецизионных узлах трения / Л.Б. Леонтьев, Н.П. Шапкин, А.Л. Леонтьев // Металлообработка. – 2011. – № 3. – С. 14–17.

4. Погодаев Л.И. Структурно-энергетические модели надежности материалов и технических средств / Л.И. Погодаев, А.А. Кузьмин. – СПб.: СПГУВК, 2010. – 123 с.

5. Хмелевская В.Б. Технологические процессы восстановления и упрочнения деталей механизмов / В.Б. Хмелевская, М.Б. Мяконьков, В.М. Петров. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 192 с.

References

1. Lazarev S.Y. Criteria of selection of natural mineral materials and other materials for the coatings for different purposes / S.Y. Lazarev, S.B. Tokman, V.B. Khmelevskaya // Metalworking. 2006. no. 3 (33). pp. 29–35.

2. Leontiev L.B. Reliability Engineering support marine equipment. Vladivostok: Mor. State. University Press, 2009. 544 p.

3. Leontev L.B. Formation of wear-resistant coatings on precision nodes friction / L.B. Leontiev, N.P. Shapkin, A.L. Leontiev // Metalworking. 2011. no. 3. pp. 14–17.

4. Pogodaev L.I. Structural and energy models for the reliability of materials and technical means / L.I. Pogodaev, A.A. Kuzmin. SPb.: SPGUVK, 2010. 123 p.

5. Khmelevskaya V.B. Processes recovery and hardening of mechanisms / V.B. Khmelevskaya, M.B. Myakonkov, V.M. Petrov. SPb.: Izd Polytechnic. University Press, 2010. 192 p.

Рецензенты:

Москаленко А.Д., д.т.н., профессор, президент Дальневосточного отделения Российской академии транспорта, г. Владивосток;

Юдаков А.А., д.т.н., профессор, зам. директора Института химии ДВО РАН по инновациям, г. Владивосток.

Работа поступила в редакцию 26.10.2012.