

15. Антифрикционные покрытия // atf.ru URL: https://atf.ru/production/molykote/antifriktsionnye_pokrytiya/afp_na_osnove_mos2/ (дата обращения: 02.11.2023).

S.Yu. Mishakov, P.N. Hopin
Moscow Aviation Institute (MAI),
Moscow, Russia, s.mishakov@mail.ru

RESOURCE ASSESSMENT OF FRICTION MATINGS WITH SOLID-LUBRICANT COATINGS FOR MECHANISMS OPERATING IN REVERSIVE MOTION CONDITIONS

Abstract

This paper summarizes the available results of studies of the tribological characteristics of reversible mechanisms with solid lubricant coatings (SLC), and also performs a comparative analysis of tribological tests of friction matings with suspension coatings from Molykote and SLC of the VNII NP type with unidirectional and reverse rotational motion.

Keywords: solid lubricant coatings, reverse movement, unidirectional rotational movement.

УДК 621.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-247

Д. В. Ляшенко¹, М. В. Ляшенко¹, Я. Нагхави², А.Д. Бреки¹
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, liashenko.dv@gmail.com

²The University of Jordan, Amman, Jordan

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ ПОСРЕДСТВОМ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ НА ОБРАЗЦЫ ИМИТАТОРЫ ВАЛОВ РОТОРОВ-НАГНЕТАТЕЛЕЙ

Аннотация

Настоящая работа посвящена трибологическим исследованиям покрытий, нанесенных посредством роботизированной технологической установки лазерной наплавки на образцы-имитаторы валов роторов-нагнетателей. Восстановительная наплавка используется для ремонта и восстановления деталей, поврежденных в процессе эксплуатации, и качество этой наплавки играет ключевую роль в обеспечении долговечности и надежности восстановленных деталей. Результаты исследований позволят улучшить существующие технологии наплавки, а также разработать рекомендации по подготовке и обработке деталей, что будет способствовать повышению их эксплуатационных характеристик и снижению издержек на ремонт и обслуживание.

Ключевые слова: наплавка, износ, трибология, покрытие, трение, металлографический анализ.

Введение

Восстановительная наплавка применяется для ремонта деталей, поверхность которых получает повреждения в результате эксплуатации. Качество восстановления детали зависит от характеристик наплавленного слоя, поскольку они

будут определять ресурс при дальнейшей работе. [1-6].

Определение свойств наплавки важно для оценки качества выполненных работ, настройки и проверки технологий наплавки, а также подготовки деталей к нанесению наплавки. [2,7,12].

Цель работы: провести трибологические износные испытания покрытий, нанесенных посредством роботизированной технологической установки лазерной наплавки IRS-OD-CLAD-6 на образцы-имитаторы валов роторов-нагнетателей ГПА Ц-16 и Н-380-18-1 ГТК 10–4.

Материалы и методы испытаний

Методика основана «Методические указания по изготовлению образцов-имитаторов, проведению механических испытаний и неразрушающего контроля качества наплавки при квалификационных и аттестационных испытаниях наплавочных материалов, роботизированной технологической установки лазерной наплавки IRS-OD-CLAD-6 и технологий лазерной наплавки для ремонта валов роторов нагнетателей ГПА Ц-16 и Н-370-18-1 ГТК 10-4 на методике испытаний на износостойкость основного материала и покрытий, разработанной и внедренной Политехническим университетом. [6,11-15].

Образцы наплавки (образцы-имитаторы валов) поставляются Заказчиком в виде цилиндрических деталей из сталей (табл. 1). [13].

Таблица 1 - Образцы-имитаторы валов роторов-нагнетателей с наплавками и без наплавки

Маркировка образца	Наружный диаметр	Наплавка	Толщина слоя наплавки, мм	Марка стали основы
КСС-1	D128	однослойная	1,6-1,8	Сталь 40ХН ГОСТ 4543-71
КСС-2	D126	двухслойная	3,0-3,5	Сталь 40ХН ГОСТ 4543-71
КСС-3	D130	нет	-	Сталь 40ХН ГОСТ 4543-71 ТВЧ HRC 45-50
КСС-4	D138	однослойная	1,6-1,8	Сталь 34ХН3МА ГОСТ 8479-70
КСС-5	D136	двухслойная	3,0-3,5	Сталь 34ХН3МА ГОСТ 8479-70
КСС-6	D140	нет	-	Сталь 34ХН3МА ГОСТ 8479-70 без ХТО

Из поставленных образцов-имитаторов (рисунок 1) изготовлены образцы для металлографических исследований в соответствии с Рисунком 2. Металлографические образцы располагались далее 30 мм от края наплавки и включают в себя сечение наплавки, линию сплавления, зону термического влияния с прилегающими к ней участками основного металла.

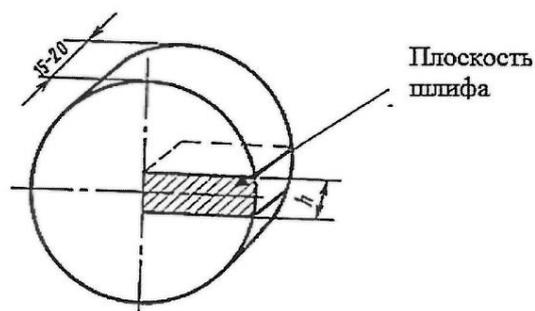
Из образцов-имитаторов КСС-1, КСС-2, КСС-4, КСС-5 вырезано по 1 металлографическому образцу. Образцы до исследования хранились в подписанных прозрачных пластиковых пакетах в условиях, исключающих их случайное перепутывание. Из образцов-имитаторов КСС-3 КСС-6 вырезка не производилась.

Для исследования трибологических характеристик наплавки производится вырезание образцов цилиндрической формы, содержащих наплавленный слой.

Выкраивание производится по схеме, приведённой на рисунок 3. Из каждого из образцов КСС-1, КСС-2, КСС-3, КСС-4, КСС-5, КСС-6 выкраивается по 2 образца.



Рисунок. 1 - Внешний вид образцов-имитаторов



h – ширина образца

Рисунок. 2 - Схема вырезки образца для металлографических исследований

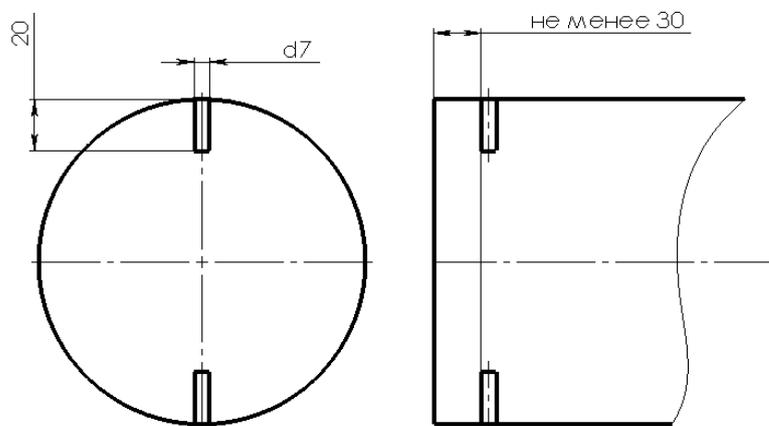


Рисунок. 3 - Вырезка образцов для трибологических испытаний

Оборудование

Машина трения для абразивных испытаний

Для испытаний использована машина МТВП (рисунок 4).



Рисунок. 4 - Машина МТВП

Установка МТВП – машина возвратно-поступательного трения с подвижным столом.

Машина оснащена различными захватами для удержания образцов плоской и цилиндрической формы, системой нагружения образца (созданием прижимающей силы до 650 Н) с помощью гирь, а также подвижным столом для закрепления контртела с регулировкой скорости перемещения (0-50 см/мин) и амплитуды (5-150 мм). На столе может быть установлена емкость, заполненная жидкостью для смазки и охлаждения зоны трения. [14].

В процессе испытаний встроенным датчиком регистрируется сила трения с периодичностью примерно 1 измерение в секунду.

Схема абразивных испытаний

Схема лабораторных испытаний возвратно-поступательная, с цилиндрическим образцом, прижатом к абразивной поверхности торцевой частью. Схема приведена на рисунке 5. [15].

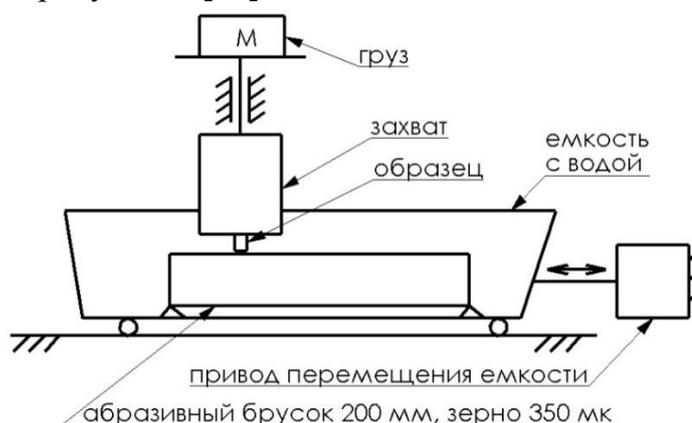


Рисунок 5 - Схема испытания на машине МТВП

Сила прижатия образца 5 кгс, при площади торцевой поверхности $0,785 \text{ см}^2$ давление в зоне контакта при испытаниях составило $6,366 \text{ кг/см}^2$.

Скорость в контакте образца с абразивным бруском 8 мм/с, амплитуда возвратно-поступательного движения 120 мм, частота возвратно-поступательного движения 0,067 Гц (4 цикла в минуту). Средняя скорость при испытании составила 0,48 м/мин.

Температура воды при испытании контролировалась с периодичностью 10 мин. Средняя температура при испытании составила 25-27 градусов, температура заметно не повышалась на протяжении всех испытаний.

Образцы и контртело для абразивных испытаний

Цилиндрические образцы $d7$ испытывались в течение 1 часа с замами линейного износа каждые 15 минут трения. Замер износа ручной, штангенциркулем, точность 0,05 мм.

В качестве контртела использованы абразивные бруски из оксида алюминия размером 200x50x20, зернистость 200 мкм. Трение происходит под слоем воды для охлаждения и вымывания продуктов износа металла и абразива (рисунок 6). Брусок смещается раз в 15 минут таким образом, что область трения переносится на неработавшую поверхность бруска. [4].

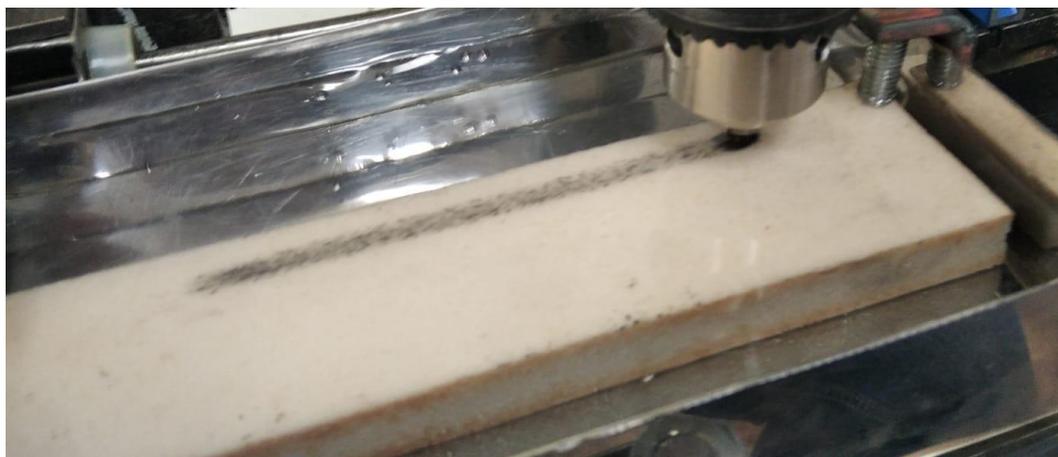


Рисунок 6 - Установленный на машине МТВП абразивный брусок из оксида алюминия в ванне под слоем чистой воды. Первые 5 минут испытания образца.

Таблица 3 - Микротвёрдость образцов

Маркировка образца	Микротвёрдость			Марка стали основы
	Металл шва	ЗТВ	Основной металл	
КСС-1	49,6–52,8 HRC	31,2–38,6 HRC	239-250 HV	Сталь 40ХН ГОСТ 4543- 71
КСС-2	46,4–52,4 HRC	33,3–34,1 HRC	196–232 HV	Сталь 40ХН ГОСТ 4543- 71
КСС-3	---	---	180–249 HV	Сталь 40ХН ГОСТ 4543- 71
КСС-4	52–55,3 HRC	41,4–44 HRC	270-279 HV	Сталь 34ХНЗМА ГОСТ 8479- 70
КСС-5	49,1–51,6 HRC	33–41,3 HRC	257-262 HV	Сталь 34ХНЗМА ГОСТ 8479- 70
КСС-6	---	---	263-290 HV	Сталь 34ХНЗМА ГОСТ 8479- 70

Результаты и обсуждение

Полученные при испытаниях данные сведены в таблицы 4-6.

Скорость износа определялась как изменение линейного размера образца (рис. 7), отнесенное к фактическому времени его испытания. В таблице 5 приведены значения износа, усредненные между двумя образцами для каждого материала.

Распределение общего износа образцов между 4 15-минутными периодами испытания показано на диаграмме рис. 8.



Рисунок 7 - Внешний вид вырезанных образцов с наплавкой. Пример.

Таблица 4 - Результаты абразивных испытаний образцов

Образец №	Маркировка образца-имитатора	Линейный размер образца до начала испытаний, мм	Линейный размер образца (мм) после испытания (мин)			
			15	30	45	60
1	126	60,65	60,625	60,425	60,25	60,12
2	127	62,35	62,3	62,15	62,03	61,95
3	128	65,9	65,8	65,65	65,48	65,4
4	138	71,575	71,5	71,4	71,2	70,96
5	140	70,35	70,2	70,09	69,95	69,65
6	136	67	66,865	66,725	66,595	66,45
7	136	71,625	71,475	71,4	71,27	71,15
8	126	67,6	67,525	67,4	67,2	67,125
9	127	63,225	63,125	63	62,925	62,9
10	128	61,2	61,075	60,95	60,8	60,725
11	138	67,075	67	66,9	66,815	66,725
12	140	68,45	68,35	68,25	68,2	68,05

Таблица 5 - Рассчитанные величины износа испытанных покрытий

Маркировка образца-имитатора		Общий износ образца за время испытания 60 мин, мм	Износ образца (мм) в течение времени испытания (мин)				Характеристика материала основы и наплавки
			0-15	15-30	30-45	45-60	
КСС-1	128	0,488	0,113	0,138	0,16	0,078	Сталь 40ХН, однослойная, 1,5-1,7мм
КСС-2	126	0,503	0,05	0,163	0,188	0,103	Сталь 40ХН, двухслойная, 2,9-3,2 мм
КСС-3	127	0,363	0,075	0,138	0,098	0,053	Сталь 40ХН, без наплавки, ТВЧ НРС 45-50
КСС-4	138	0,485	0,083	0,095	0,143	0,165	Сталь 34ХНЗМА, однослойная, 1,8-2,2 мм
КСС-5	136	0,508	0,143	0,105	0,133	0,128	Сталь 34ХНЗМА, двухслойная, 2,6-3,2 мм
КСС-6	140	0,55	0,125	0,105	0,095	0,225	Сталь 34ХНЗМА, без наплавки, без ХТО

Таблица 6 - Результаты статистической обработки массивов величин сил трения от времени

Маркировка образца-имитатора		Коэффициент трения покрытия по абразивному бруску в воде, ед.				
		Среднее значение	Дисперсия	Мода	Медианное значение	Стандартное отклонение
КСС-1	128	0,71	3,91	0,319	0,80	0,26
КСС-2	126	0,75	3,97	0,318	0,85	0,26
КСС-3	127	0,61	3,71	0,335	0,64	0,25
КСС-4	138	0,74	3,84	0,288	0,76	0,25
КСС-5	136	0,75	2,84	0,794	0,81	0,22
КСС-6	140	0,65	2,89	0,331	0,69	0,22

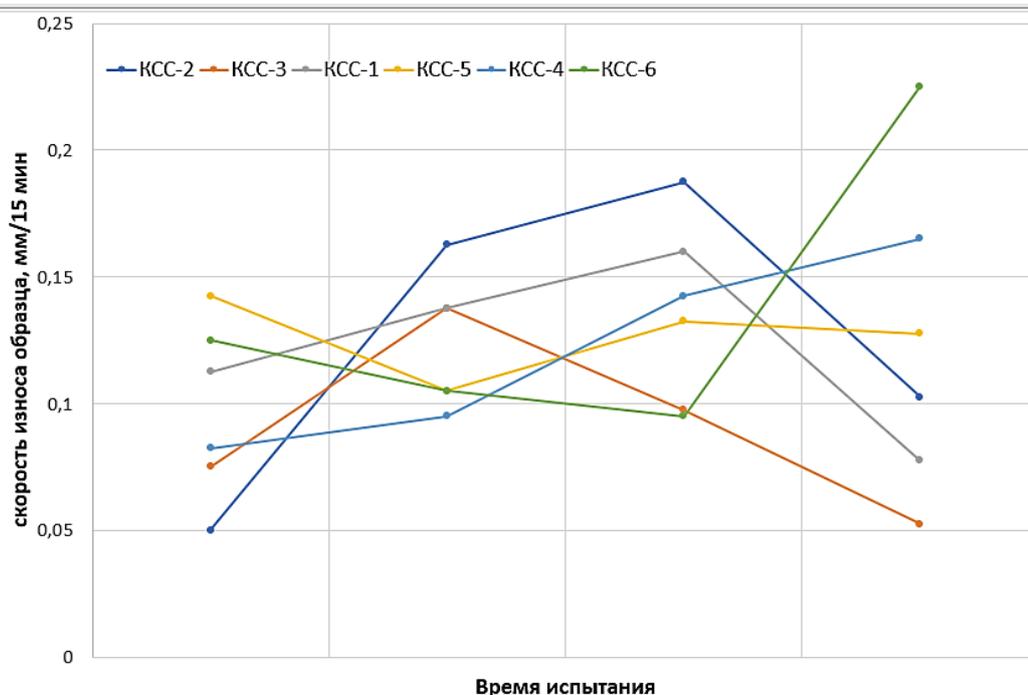


Рисунок 8 - Зависимость скорости износа образцов от времени испытания. Общая длительность испытания каждого образца 60 мин.

При испытании образцов проводилась непрерывная регистрация силы трения образца об абразивный брусок. Примеры графиков трения приведены на рис. 9, 10, 11.

Статистическая обработка записанных диаграмм позволила определить для каждого покрытия средние значения коэффициентов трения, а также иные статистические характеристики. Мгновенное значение коэффициента трения определялось с учетом постоянной силы прижатия образца к абразивному бруску 5 кг. Результаты статистической обработки записанных данных сведены в таблицу 6.

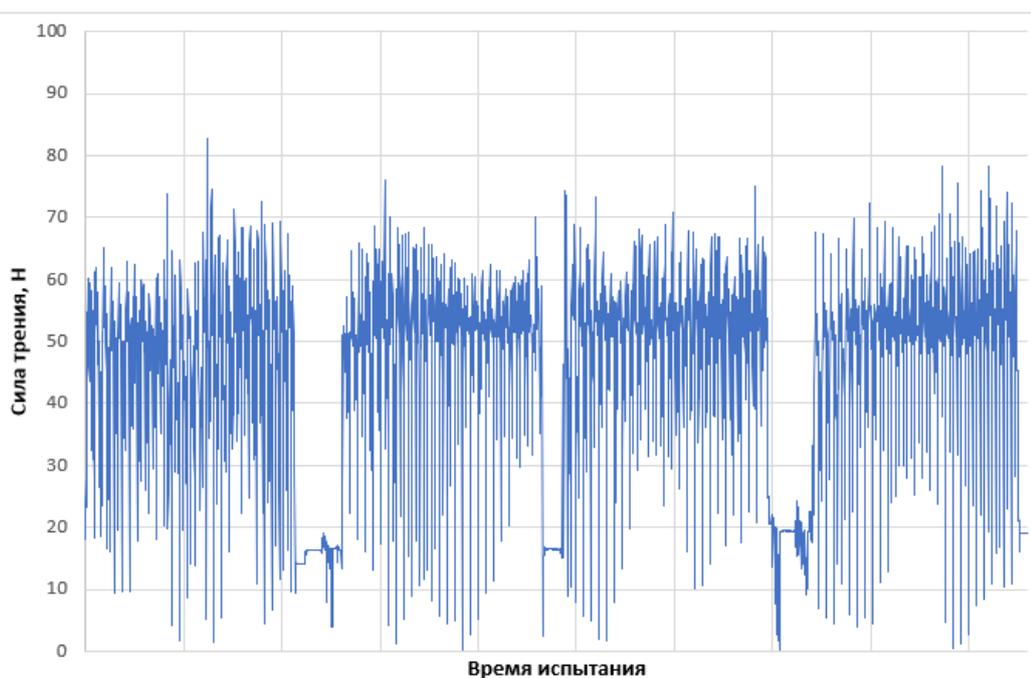


Рисунок 9 - Пример диаграммы силы трения от времени при испытании образца KCC-2 (образец 1). Время испытания 60 мин (4 периода по 15 мин).

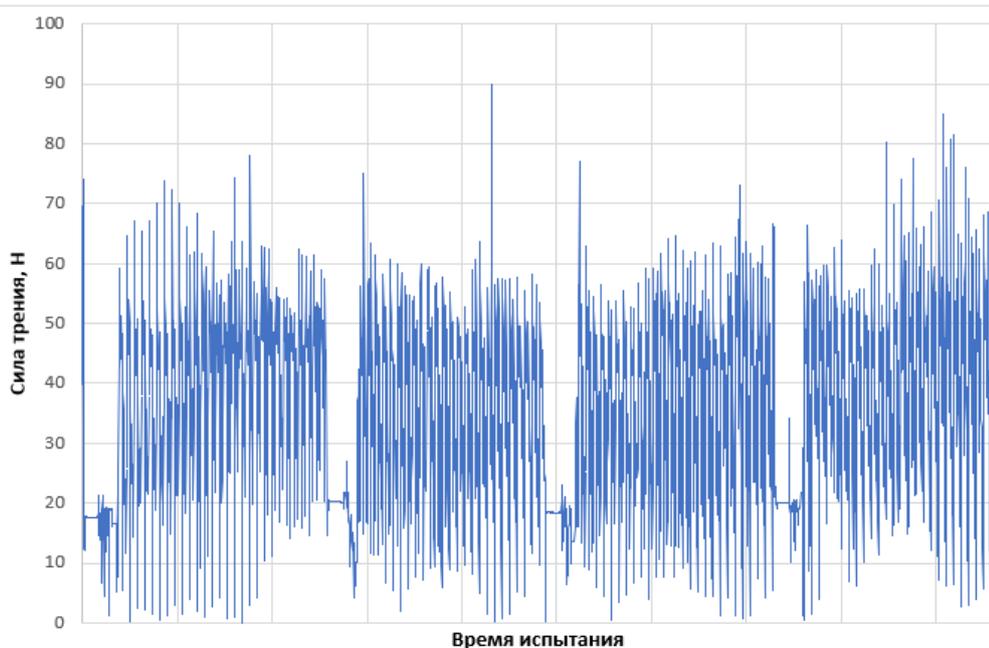


Рисунок 10 - Пример диаграммы силы трения от времени при испытании образца КСС-3 (образец 2). Время испытания 60 мин (4 периода по 15 мин).

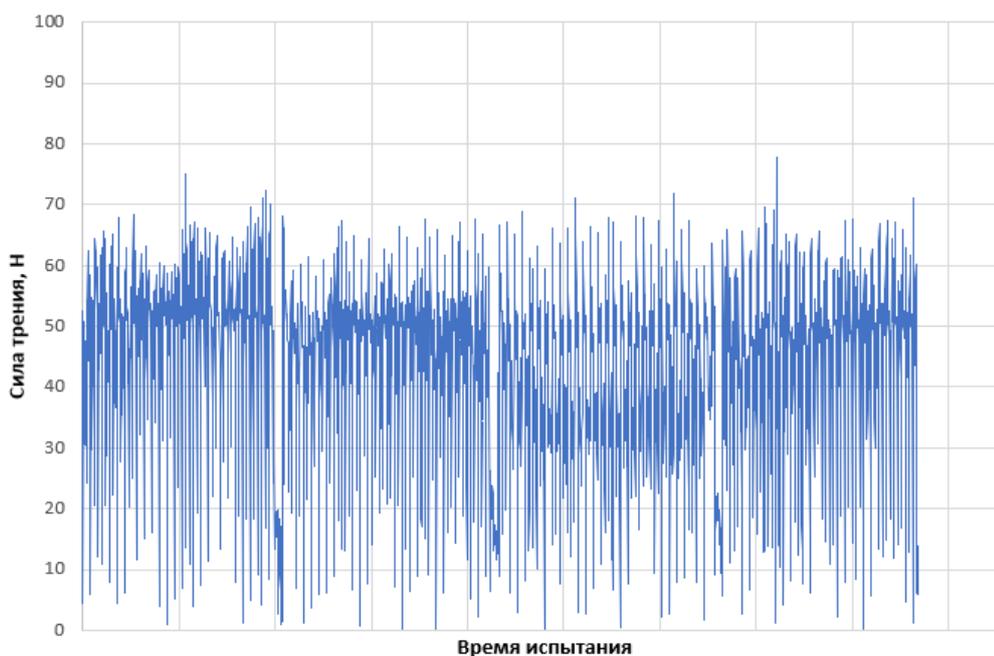


Рисунок 11 - Пример диаграммы силы трения от времени при испытании образца КСС-5 (образец 6). Время испытания 60 мин (4 периода по 15 мин).

Заключение

1. Величина износа исследованных образцов покрытий находится в диапазоне 0,485 ... 0,51 мм за 1 час испытаний. Результаты испытаний наплавов достаточно стабильные и повторяемые, что объясняется в том числе стабильными свойствами наплавленного материала;

2. Величины износа образцов без наплавки (КСС-3 и КСС-6) заметно отличаются от износа наплавов. Среднее значение износа образцов из КСС-3 (сталь 40ХН, закалка ТВЧ HRC 41.9 ... 45.1) 0,363 мм за 1 час испытаний. Скорость износа заметно ниже, чем у наплавов в первую очередь за счет более высокой твердости. Среднее значение износа образцов из КСС-6 (сталь 34ХНЗМА, без наплавки, без

ХТО, HRC 21..27) 0,55 мм превышает по скорости износ наплавки, что объясняется меньшей поверхностной твердостью материала КСС-6;

3. Зависимость скорости износа от глубины износа для исследованных материалов выражена незначительно по крайней мере на глубинах до 0,8 мм;

4. Коэффициенты трения исследованных покрытий находятся в узком диапазоне 0,71 ... 0,75 с хорошими статистическими показателями. Средние значения коэффициентов трения образцов без покрытия ниже, чем у образцов с покрытиями, и составляют для КСС-3 0,605, для КСС-6 0,647. Меньшее значение коэффициента трения образцов КСС-3 связано скорее всего с большей твердостью наружной части образца-имитатора.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин, Е. И., & Павлов, В. В. (2014). Исследование трибологических характеристик алюминиевого сплава АМг6 после лазерной ультрадисперсионной наплавки твердосплавами. Вестник Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение, (5), 64-72.

2. Горшков, В. И., Горшков, В. В., & Буянков, А. В. (2016). Исследование трибологических характеристик поверхностного слоя наплавленных и закаленных деталей. Трение и износ, (37), 313-319.

3. Дудинский, Ю. В., & Смолякова, Т. И. (2018). Влияние параметров лазерной наплавки на триботехнические свойства сталей. Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 21(3), 101-105.

4. Леонов, С. Б., & Барков, В. Ю. (2019). Исследование влияния режимов лазерного наплавления на триботехнические характеристики наплавки из стали 12Х18Н10Т. Трение и износ, (40), 499-504.

5. Михайлов, А. А., & Васильев, А. И. (2017). Исследование триботехнических характеристик стали 45 после наплавки плазменной сваркой с применением добавок на основе твердых сплавов. Вестник ТГТУ, 23(4), 35-41.

6. Шаповалов, В. Н., & Яковлев, А. А. (2015). Исследование износостойкости поверхностей, модифицированных лазерной наплавкой. Сибирский журнал науки и технологий, (5), 89-96.

7. Кожемякин, А. Н., & Тарасов, В. В. (2017). Влияние лазерной наплавки на трибологические свойства инструментальных сталей. Металловедение и термическая обработка металлов, (2), 47-53.

8. Петров, И. В., & Горячев, А. Н. (2016). Трибологические испытания покрытий, полученных лазерной наплавкой с использованием порошковых материалов. Вестник машиностроения, (9), 32-37.

9. Сидоров, А. А., & Лебедев, Н. М. (2018). Влияние режимов лазерного наплавления на свойства покрытий из твердосплавных материалов. Физика и химия обработки материалов, (3), 124-130.

10. Зайцев, М. В., & Нефедов, А. И. (2019). Анализ износостойкости наплавленных покрытий на основе карбидов вольфрама. Металлы, (6), 49-55.

11. Тихонов, В. П., & Рогов, В. Н. (2017). Технологические особенности и трибологические характеристики наплавки из высокотемпературных сплавов. Известия вузов. Черная металлургия, (8), 75-82.

12. Лисин, Д. А., & Сидоров, Е. В. (2016). Лазерная наплавка как метод улучшения трибологических свойств металлических деталей. Известия высших учебных заведений.

Машиностроение, (12), 88-93.

13. Гордеев, Ю. В., & Серебряков, И. П. (2018). Исследование влияния параметров лазерной наплавки на адгезионные свойства покрытий. Поверхностные явления и покрытия, (4), 110-116.

14. Макаров, В. С., & Кузнецов, Д. С. (2019). Трибологические свойства покрытий, нанесенных лазерной наплавкой с применением нанопорошков. Вестник НГТУ им. Р.Е. Алексеева, (5), 96-103.

15. Иванов, С. А., & Петров, Н. В. (2020). Влияние состава порошков на триботехнические характеристики покрытий, полученных лазерной наплавкой. Техника и технология, (2), 55-61.

D. V. Lyashenko¹, M. V. Lyashenko¹, Y. Naghawi², A. D. Breki¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, liashenko.dv@gmail.com

²The University of Jordan, Amman, Jordan

Tribological studies of coatings applied by means of a robotic technological installation of laser surfacing on samples simulating shafts of rotor-boosters.

This study focuses on the tribological investigations of coatings applied by a robotic technological installation of laser cladding on samples simulating shafts of rotor-boosters. Restorative cladding is used for repairing and restoring parts that have been damaged during operation, and the quality of this cladding is crucial for ensuring the durability and reliability of the restored parts. The research results will help improve existing cladding technologies and develop recommendations for the preparation and treatment of parts, contributing to enhanced performance characteristics and reduced repair and maintenance costs.

Keywords: surfacing, wear, tribology, coating, friction, metallographic analysis.

УДК 621.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-248

Д.А. Виноградов^{1,2}, Д.В. Ляшенко^{1,2}, М.А. Ковалёв^{1,2}, Qian Jiang³

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

²НТК «Новые технологии и материалы»

Санкт-Петербург, Россия. den895619@gmail.com

³Changchun University, Changchun, 6543, Satellite Road, China

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕКОМПРЕССИИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И ПОЛИМЕРНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Аннотация

В работе изучалось влияние циклической декомпрессии на изменение свойств систем дуплексного металл-полимерного (ZiPLY97) и металлического (FeZn) покрытий, предполагающихся для нанесения на внутреннюю поверхность труб нефтегазовой отрасли. По результатам исследований, проведение циклических декомпрессионных испытаний может быть использовано, как альтернативный метод подтверждения разрушения покрытия.

Ключевые слова: антикоррозионные покрытия, полимерные покрытия, автоклавные испытания, декомпрессия