

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-359-368>

УДК 621.793

Структура и триботехнические свойства хромовых покрытий, сформированных электродеформационным плакированием гибким инструментом

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег¹⁾, канд. техн. наук М. А. Леванцевич¹⁾, магистр техн. наук Е. В. Пилипчук¹⁾, инж. С. М. Назаров¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Приведены результаты исследований структуры и триботехнических свойств хромовых покрытий, сформированных методом электродеформационного плакирования гибким инструментом (ЭДПИ), выполненных с целью оценки перспектив их применения в качестве альтернативы гальваническому хромированию, широко используемому при изготовлении штоков гидроцилиндров металлорежущих станков. В качестве гибкого инструмента применялись вращающиеся металлические щетки с проволочным ворсом, выполненным из стали 65Г и нержавеющей стали 03X17H14M2. Материал-донор при ЭДПИ – компактированный брусок, полученный путем спекания смеси порошков чистого хрома и наноразмерной алмазно-графитовой шихты УДАГ. По результатам исследований установлено, что при формировании покрытий щеткой из нержавеющей стали в состав покрытия привносятся легирующие элементы проволочного ворса, такие как хром и никель. Так, в случае использования щеток с проволочным ворсом из нержавеющей стали 03X17H14M2 количество хрома и никеля в плакированном слое покрытия по процентному содержанию соответственно в 5,3 и 9,6 раза больше, чем в покрытии, сформированном щеткой из стали 65Г, что может способствовать повышению коррозионной стойкости покрытий. При этом рельеф поверхности покрытия имеет развитую шероховатую структуру, состоящую из плотно уложенных и вытянутых в направлении вращения щетки различных по размерам микрочастиц хрома, а также сглаженных микровыступов и микроуглублений, дефекты покрытия в виде несплошностей и отслоений отсутствуют. Триботехнические испытания выполнялись в условиях «граничного смазки» на машине трения вращательного типа, реализующей трение резинового индентора по плоской поверхности вращающегося диска. По данным триботехнических испытаний установлено, что в условиях «граничного трения» спаренных образцов «диск с покрытием – резиновый ролик» наименьшими значениями величин коэффициента трения скольжения ($f_{\text{тр}} = 0,023$) обладают хромовые покрытия, сформированные методом ЭДПИ, которые в 7,5 раза меньше, чем у хромовых, полученных гальваническим осаждением. В то же время износ резиновых роликов в парах с гальваническими хромовыми покрытиями оказывался меньшим, чем в парах с покрытием, сформированным методом ЭДПИ.

Ключевые слова: электродеформационное плакирование гибким инструментом, шток гидроцилиндра, вращающаяся металлическая щетка, материал-донор, покрытие, гальванический хром, ультрадисперсная алмазно-графитовая шихта, коэффициент трения скольжения, «граничное трение», износ, шероховатость

Для цитирования: Структура и триботехнические свойства хромовых покрытий, сформированных электродеформационным плакированием гибким инструментом / В. К. Шелег [и др.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 5. С. 359–368. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-359-368>

Адрес для переписки

Шелег Валерий Константинович
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

Address for correspondence

Sheleg Valery K.
Belarusian National Technical University
9 B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

Structure and Tribological Properties of Chromium Coatings Formed by Electrodeformation Cladding with Flexible Tools

V. K. Sheleg¹⁾, M. A. Levantsevich¹⁾, Y. V. Pilipchuk¹⁾, S. M. Nazarov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper contains results of investigations on structure and tribotechnical properties of chromium coatings formed by a method of electrodeformation cladding with flexible tools (EDCFT). The purpose of these investigations is to assess prospects for application of the coatings as an alternative to galvanic chrome plating which is widely used in manufacturing hydraulic cylinder rods of metal-cutting machines. Rotary metal brushes with a wire pile made of 65Г-steel and 03X17H14M2-stainless steel have been used as a flexible tool. A compacted bar obtained by sintering a mixture of pure chromium powders and a nano-sized diamond-graphite blend UDDG has been employed as a donor material for EDCFT. According to results of the research it has been established that alloying elements of wire pile such as chromium and nickel are added to a coating composition while forming coatings a stainless steel brush. So in the case of using brushes with wire pile of 03X17H14M2-stainless steel the amount of chromium and nickel in a clad coating layer is 5.3 and 9.6 times higher in percentage, respectively, in comparison with the coating formed by a 65Г-steel brush that can contribute to improvement of coating corrosion resistance. At the same time, surface relief of the coating has a developed rough structure consisting of chromium microparticles having various size that are tightly packed and elongated in the direction of brush rotation and there are no flaws in the form of discontinuities and delaminations. Tribological tests have been performed under conditions of “boundary lubrication” on a rotary friction machine that implements friction of a rubber indenter on a flat surface of a rotating disk. According to data of the tribotechnical tests it has been ascertained that under conditions of “boundary friction” for such paired samples as “coated disc – rubber roller” chromium coatings formed by the EDCFT method, have the lowest values of a sliding friction coefficient ($f_{\text{тр}} = 0.023$) which are 7.5 times lower than chromium coatings obtained by electroplating. At the same time the wear of rubber rollers in pairs with electroplated chromium coatings has turned out to be less than in pairs with the coating formed by the EDCFT method.

Keywords: electrodeformation cladding with a flexible tool, hydraulic cylinder rod, rotating metal brush, donor material, coating, electroplating chrome, ultradispersed diamond-graphite mixture, coefficient of sliding friction, “boundary friction”, wear, roughness

For citation: Sheleg V. K., Levantsevich M. A., Pilipchuk Y. V., Nazarov S. M. (2019) Structure and Tribological Properties of Chromium Coatings Formed by Electrodeformation Cladding with Flexible Tools. *Science and Technique*. 18 (5), 359–368. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-359-368> (in Russian)

Введение

В различных типах гидроприводов металло-режущих станков широкое применение получили гидроцилиндры возвратно-поступательного движения, использующие в качестве герметизирующих элементов манжетные резиновые уплотнения [1, 2]. Для обеспечения надежной герметизации (уплотнения) соединения «шток – резиновая манжета», а также высокой износо- и коррозионной стойкости поверхность штока в подобных гидроцилиндрах подвергают гальваническому хромированию с осаждением слоя твердого хрома толщиной 20–25 мкм [3]. Однако технологии гальванического хромирования являются экологически вредными и достаточно энергоемкими [4], в связи с чем, например в условиях мелкосерийного и индивидуального производств, при необходимости осаждения хромовых покрытий на разнообразных по номенклатуре и небольших партиях

деталей становятся совершенно нерентабельными. Поэтому возникает острая потребность в изыскании новых, сравнительно недорогих способов формирования хромовых покрытий в качестве альтернативы гальваническому хромированию.

Стоит отметить, что к настоящему времени известны положительные примеры применения технологий гиперзвуковой металлизации [5], газотермического и плазменного напыления [6, 7], электроискрового и лазерного легирования [8, 9] и других, как альтернативы гальваническому хромированию. Однако высокая стоимость используемого технологического оборудования и расходных материалов, а также необходимость привлечения высококвалифицированных специалистов для его обслуживания сдерживают их широкое промышленное применение.

В последние годы получает развитие сравнительно недорогая, малоэнергоемкая и экологически чистая технология, основанная на примене-

нии метода электродеформационного плакирования гибким инструментом (ЭДПИ), где слой покрытия на поверхности детали формируется за счет переноса ворсом вращающейся металлической щетки (ВМЩ) частичек материала покрытия (донора), а с целью интенсификации процесса плакирования на ворс ВМЩ и донор подают электрическое напряжение [10, 11]. Установлено, что хромовые покрытия, сформированные с использованием технологии ЭДПИ из доноров, полученных путем спекания смеси порошков чистого хрома и наноразмерной алмазно-графитовой шихты УДАГ (ТУ РБ 28619110.001–95) производства НП ЗАО «Синта» (Республика Беларусь), в режиме «сухого» трения с резиновым контробразцом имеют триботехнические характеристики, сопоставимые с гальваническими хромовыми покрытиями, что создает хорошие предпосылки для их практического применения [11]. Однако в ходе проводимых исследований технологии ЭДПИ было выявлено, что на качество формируемых слоев хромовых покрытий может оказывать влияние материал, из которого изготовлен ворс проволоочной щетки, а именно: из пружинной проволоки из стали 65Г или нержавеющей проволоки из стали 03Х17Н14М2. Кроме того, вследствие отсутствия данных о триботехнических характеристиках плакированных хромовых покрытий в условиях «граничного» (смешанного) трения, характерного для сопряжений «шток – резиновая манжета» [12], признано целесообразным выполнить дополнительные исследования.

Цель работы заключалась в оценке влияния материала проволоочного ворса ВМЩ на структурно-фазовый состав слоев хромовых покрытий, сформированных с использованием технологии ЭДПИ, и их триботехнические характеристики в условиях «граничного» трения.

Методика исследований

Структурно-фазовые исследования проводились на образцах пластин (10×6×2 мм) из стали 45 (HRC 43...45) с хромовым покрытием, сформированным из донора, полученного методами порошковой металлургии путем спекания смеси порошков чистого хрома и нанораз-

мерной алмазно-графитовой шихты УДАГ (не более 1 мас. %). Электродеформационное плакирование осуществлялось поочередно вращающимися металлическими щетками с гофрированным ворсом, выполненным из стали 65Г и нержавеющей стали 03Х17Н14М2 (производства фирмы OSBORN). Диаметр и ширина щеток составляли соответственно 200 и 30 мм, линейная скорость вращения 30 м/с, диаметр и вылет ворса 0,2 и 40 мм, сила тока $I = 140$ А. После обработки толщина сформированного слоя покрытия, измеренного с помощью прибора МТЦ-3, составила 3–5 мкм для покрытий, сформированных щеткой с ворсом, выполненным из стали 65Г, и 7–10 мкм – для покрытий, сформированных щеткой с ворсом из нержавеющей стали. Параметр шероховатости поверхности Ra покрытия: 0,25–0,35 мкм – для покрытия, выполненного щеткой из стали 65Г, и 0,7–0,9 мкм – щеткой из нержавеющей стали.

Для металлографического анализа поверхностных слоев образцов, подвергнутых деформационному плакированию, использовался инвертированный микроскоп «Альтаи МЕТ 1МТ». Травление микроструктуры шлифов проводилось с использованием реактива Куррана (HCl – 50 мл; CuSO₄ – 10 г; H₂O – 50 мл), а также Марбле (50 мл HCl; 2 г CuSO₄; 50 мл C₂H₅OH; 50 мл H₂O).

Рентгеноструктурный анализ исследуемых образцов выполняли на дифрактометре ДРОН 3.0 в монохроматизированном СоК α -излучении при ускоряющем напряжении 30 кВ и анодном токе 15 мА. Рентгеновская съемка осуществлялась с фокусировкой по Брэггу – Brentano в режиме сканирования (по точкам) с шагом 0,1° и временем набора импульсов на точку 10 с. С целью исследования фазового состава тонких поверхностных слоев был применен метод скользящего пучка ($\psi = 6^\circ$). Для расшифровки фазового состава использовалась картотека стандартных спектров PDF. Обработку данных рентгеноструктурного анализа осуществляли с помощью автоматизированного программного комплекса Diffraction Plus EVA.

Для проведения триботехнических испытаний использовали образцы в виде дисков из стали 40Х диаметром 70 мм и толщиной 5 мм, подвергнутые объемной закалке до твердо-

сти 50 HRC и последующей шлифовке до $Ra = 0,2-0,3$ мкм. В качестве контрообразцов применяли цилиндрические ролики диаметром 6 мм и длиной 12 мм, изготовленные из маслобензостойкой резины с модулем упругости 15 МПа.

На плоских поверхностях дисков методами гальванического осаждения и ЭДПГИ формировали хромовые покрытия.

В качестве материала-донора при ЭДПГИ использовали компактированный брусок, полученный путем спекания смеси порошков чистого хрома и наноразмерной алмазно-графитовой шихты УДАГ (ТУ РБ 28619110.001–95) производства НП ЗАО «Синта» в количестве не более 1 мас. %.

Электродеформационное плакирование гибким инструментом выполняли вращающейся цилиндрической щеткой размером $200 \times 20 \times 22$ мм с длиной и диаметром проволочного ворса соответственно 55,00 и 0,25 мм. Технологические режимы ЭДПГИ: линейная скорость вращения щетки 30 м/с, натяг 2 мм, число проходов щетки 8, частота вращения диска $7,3 \text{ мин}^{-1}$. Величина подаваемого напряжения 40 В, сила тока 140 А. Толщина слоя хромовых покрытий, сформированных способом ЭДПГИ, не превышала 5–7 мкм, микротвердость $HV_{0,2} = 612-634$.

Электролитическое хромирование с осаждением слоя твердого ($HV_{0,2} = 990-1200$) хрома толщиной 30–35 мкм выполнялось по типовой технологии, применяемой на НП ЗАО «Синта». Причем три диска с гальваническим хромовым покрытием подвергали последующему шлифованию и три – шлифованию, затем полированию. Соответственно три диска с хромовыми покрытиями, сформированными методом ЭДПГИ, только полировались и три – использовались в исходном состоянии, т. е. без последующей шлифовки и полировки. Триботехнические испытания экспериментальных образцов дисков с покрытием проводили на машине трения одностороннего вращения, реализующей трение торцевой поверхности резинового ролика (контробразца) по плоской поверхности диска с покрытием.

Испытания на трение и износ выполняли при следующих условиях: скорость вращения диска с покрытием 834 мин^{-1} ; относительная

скорость скольжения ролика по диску 2,4 м/с; удельная нагрузка в зоне контакта торца ролика с поверхностью диска 0,5 МПа; продолжительность испытаний каждой пары трения составляла 120 мин, что соответствовало пути трения 17280 м. В ходе триботехнических испытаний воспроизводился режим, приближенный к режиму «граничного» трения, т. е. к режиму трения с ограниченной подачей смазочного материала. В связи с этим смазывание дорожки трения на диске осуществлялось фитилем, пропитываемым капельным способом (12 капель в минуту) гидравлическим маслом М10Г2.

Регистрацию момента силы трения скольжения, который затем пересчитывался в коэффициент трения скольжения $f_{тр}$, проводили на протяжении всего цикла испытаний каждой пары трения. Износ Δm роликов и дисков оценивали по величине убыли их массы, определяемой по разности масс до и после испытаний путем взвешивания на аналитических весах ВЛР-200 с точностью до 0,00001 г.

Экспериментальные результаты

Изучение морфологии поверхности хромовых покрытий, сформированных методом ЭДПГИ, показало, что рельеф поверхности покрытия имеет развитую шероховатую структуру (рис. 1а), состоящую из плотно уложенных и вытянутых в направлении вращения щетки различных по размерам микрочастиц хрома, а также сглаженных микровыступов и микроуглублений. Дефекты покрытия в виде несплошностей и отслоений отсутствуют.

Между слоем хромового покрытия и основой наблюдается граница раздела без видимых признаков наличия промежуточного слоя (рис. 1б).

Исследование структуры и фазового состава плакированных слоев хромовых покрытий выявило присутствие в них аустенита и хрома (рис. 2, табл. 1). Период кристаллической решетки плакированного хрома составляет $a = 0,2884$ нм. При этом количество хрома и никеля в плакированном слое покрытия, сформированном щеткой из нержавеющей стали, по процентному содержанию соответственно в 5,3 и 9,6 раза больше, чем в покрытии, сформированном щеткой из стали 65Г (табл. 1).

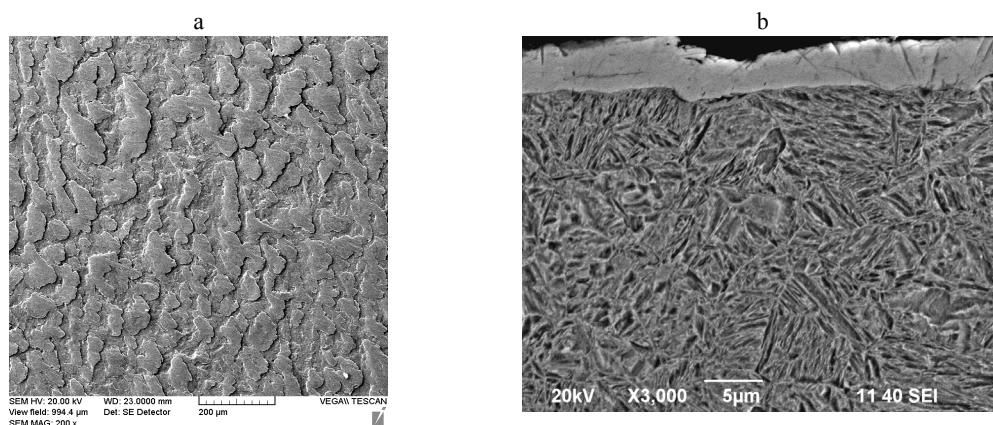


Рис. 1. Фото рельефа поверхности (а) и микроструктуры (b) образца из стали 45 с хромовым покрытием, сформированным методом электродеформационного плакирования гибким инструментом

Fig. 1. Photo of surface relief (a) and microstructure (b) for steel-45 sample with chrome coating formed by electrodeformation cladding [EDCFT] method with flexible tools

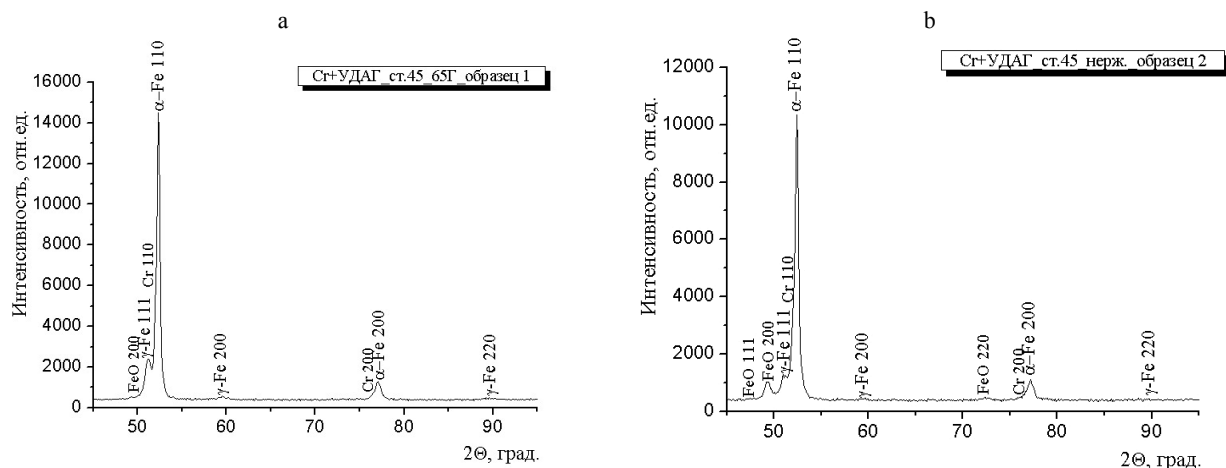


Рис. 2. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм хромовых покрытий, сформированных методом электродеформационного плакирования гибким инструментом на поверхности стали 45 с использованием вращающихся металлических щеток с ворсом, выполненным из стали 65Г (а) и нержавеющей стали 03X17H14M2 (b)

Fig. 2. Fragments of X-ray diffraction patterns for chromium coatings formed by EDCFT method on surface of steel-45 using rotary metal brushes [RMB] with wire pile made of 65Г-steel (a) and 03X17H14M2-stainless steel (b)

Таблица 1

Химический состав хромовых покрытий, сформированных на поверхностях образцов из стали 45 методом электродеформационного плакирования гибким инструментом с использованием вращающихся металлических щеток с ворсом, выполненным из стали 65Г (1) и нержавеющей стали 03X17H14M2 (2)

Chemical composition of chromium coatings formed on surfaces of steel-45 samples by EDCFT method using RMB with pile made of 65Г-steel (1) and 03X17H14M2-stainless steel (2)

№ образца		Al	Si	P	S	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Mo	Fe
1	Покрытие		0,441	0,060	0,016	0,506	0,556	0,181	0,153	0,020		Основа
	Основа	0,132	0,441	0,052	0,017	0,121	0,557	0,185	0,170			Основа
2	Покрытие	0,187	0,681	0,074	0,014	2,697	0,660	1,739	0,195		0,015	Основа
	Основа	0,101	0,476	0,053	0,002	0,123	0,552	0,181	0,175		0,010	Основа

Образование аустенита в поверхностных слоях плакированных образцов, а также повышенное содержание хрома и никеля в покрытии, сформированном щеткой из нержавеющей стали, свидетельствуют о том, что в процессе ЭДПГИ, наряду с частичками материала донора, в состав хромового покрытия инкорпорируются и частички материала проволочного ворса щетки, что может способствовать усилению его антикоррозионных свойств.

Анализ результатов измерений шероховатости поверхности экспериментальных образцов дисков без покрытия и с хромовыми покрытиями, сформированными гальваническим осаждением и методом ЭДПГИ, показал, что для гальванических хромовых покрытий последующая после шлифования полировка слабо влияет на снижение как разброса значений, так и общего уровня шероховатости поверхности (рис. 3, столбцы 2, 3). Для этих покрытий полировка способствовала снижению параметра шероховатости поверхности Ra в среднем на 6 %.

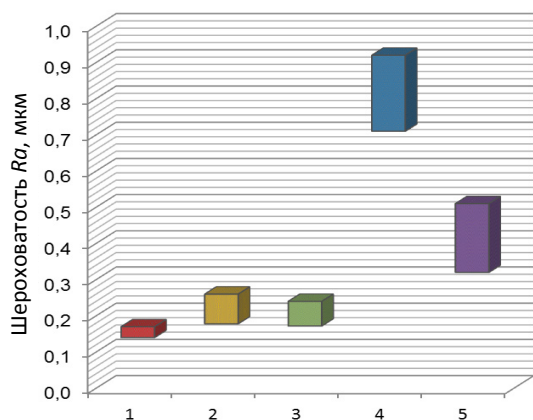


Рис. 3. Диаграмма общего уровня и разброса значений величин параметра шероховатости поверхности Ra экспериментальных образцов дисков с хромовыми покрытиями: 1 – без покрытия; 2 – с гальваническим хромовым покрытием после шлифования; 3 – то же после шлифования и последующего полирования; 4, 5 – с хромовым покрытием, сформированным электродеформационным плакированием гибким инструментом, в исходном состоянии и с последующим полированием соответственно

Fig. 3. Diagram of general level and variation in values of surface roughness parameter Ra for experimental samples of disks with chromium coatings: 1 – uncoated; 2 – with electroplating chrome plating after grinding; 3 – with electroplated chrome plating after grinding and subsequent polishing; 4, 5 – with chrome plating, formed by EDCFT in initial state and with subsequent polishing, respectively

У дисков с плакированными хромовыми покрытиями шероховатость поверхности как по общему уровню, так и по разбросу значений величин параметра Ra значительно больше, чем у гальванических хромовых покрытий (рис. 3, столбцы 4, 5). При этом хотя последующая полировка плакированных хромовых покрытий и снижает параметр шероховатости поверхности Ra с 0,71–0,92 до 0,32–0,51 мкм, тем не менее он больше, чем у гальванических неполированных хромовых покрытий ($Ra = 0,18–0,26$ мкм). Однако, несмотря на худшие показатели шероховатости, по результатам триботехнических испытаний установлено, что пары трения с образцами с неполированными и полированными плакированными хромовыми покрытиями, сформированными методом ЭДПГИ, обладают наименьшими значениями величин коэффициента трения скольжения (рис. 4, кривые 4, 5) нежели пары с образцами с гальваническими неполированными и полированными покрытиями (рис. 4, кривые 2, 3), а также пары без покрытия (рис. 4, кривая 1).

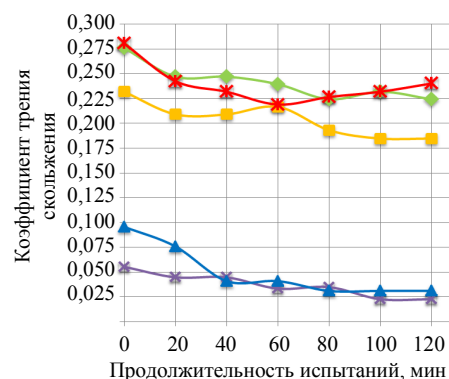


Рис. 4. Зависимости коэффициента трения скольжения для пар трения с образцами с хромовыми покрытиями от продолжительности испытаний: 1 – без покрытия; 2 – с гальваническим хромовым покрытием после шлифования; 3 – то же после шлифования и последующего полирования; 4, 5 – с хромовым покрытием, сформированным электродеформационным плакированием гибким инструментом, в исходном состоянии и с последующим полированием соответственно

Fig. 4. Dependences of sliding friction coefficient for friction pairs with chrome coating samples on test duration: 1 – without coating; 2 – with electroplating chrome plating after grinding; 3 – with electroplated chrome plating after grinding and subsequent polishing; 4, 5 – with chrome plating formed by EDCFT in initial state and with subsequent polishing, respectively

Коэффициент трения скольжения у пар с образцами с плакированными полированными хромовыми покрытиями в начальный и заключительный периоды испытаний оказался соответственно в 4,5 и 7,5 раза меньше, чем у образцов с гальваническими неполированными хромовыми покрытиями (рис. 4, кривая 2).

Как видно из представленных на рис. 4 зависимостей, значения величин коэффициента трения скольжения для всех испытываемых пар трения на протяжении 80 мин цикла испытаний имеют тенденцию к снижению. При этом коэффициент трения скольжения для пар трения с образцами без покрытия и с гальваническими неполированными и полированными хромовыми покрытиями уменьшается относительно первоначальных значений в среднем в 1,2–1,24 раза (рис. 4, кривые 1, 2, 3), а для пар с образцами с плакированными неполированными и полированными хромовыми покрытиями – в 3,1 и 1,4 раза соответственно (рис. 4, кривые 4, 5). Далее наблюдается стабилизация процесса трения у всех испытываемых пар с образцами с хромовыми покрытиями, кроме пар с образцами без покрытия, где заметно возрастание величины коэффициента трения скольжения (рис. 4, кривая 1). К концу цикла испытаний среднее значение величины коэффициента трения скольжения для трущихся пар составляло: 0,24 – для образцов без покрытия; 0,185 – для образцов с гальваническими неполированными покрытиями; 0,224 – для образцов с гальваническими

полированными покрытиями; 0,031 и 0,023 – для образцов с плакированными неполированными и полированными покрытиями соответственно.

Можно предположить, что снижению значений величин коэффициента трения скольжения у пар с образцами с плакированными хромовыми покрытиями способствует развитый микрорельеф их поверхности, характеризующийся наличием сглаженных микровыступов и микроуглублений (микрокарманов) (рис. 1а). Подобные микрокарманы, как известно, обладают способностью повышать гидроемкость поверхностного слоя, лучше удерживают смазочный материал и в процессе фрикционного взаимодействия с контртелом обеспечивают возможность возникновения гидродинамического эффекта в зоне контакта. К числу их положительных свойств относят также и то, что при преднамеренном формировании на поверхности, например штока гидроцилиндра, они способствуют снижению усилия страгивания штока в случае его длительной выдержки в неподвижном состоянии под нагрузкой благодаря способности сохранения смазочной пленки на трущейся поверхности [13, 14].

По результатам исследований величин износа образцов установлено, что наименьший износ как дисков с покрытиями, так и резиновых контрообразцов имеют пары трения с дисками с гальваническими неполированными хромовыми покрытиями, т. е. обработанные только шлифованием (рис. 5, столбец 2).

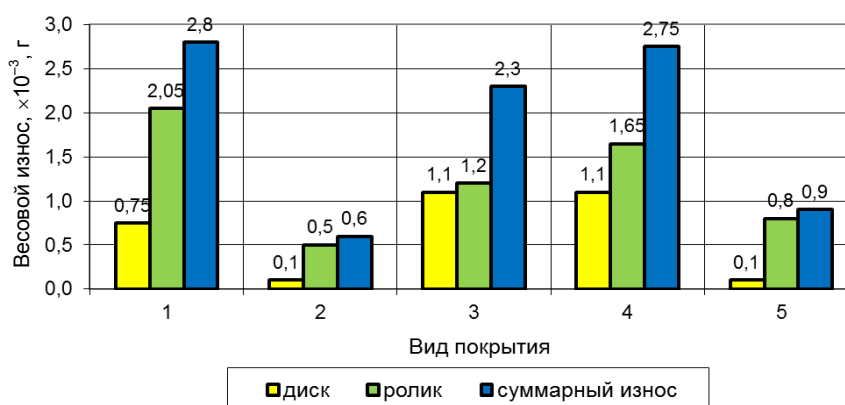


Рис. 5. Диаграмма значений величин износа для пар трения с образцами: 1 – без покрытия; 2 – с гальваническим хромовым покрытием после шлифования; 3 – то же после шлифования и последующего полирования; 4, 5 – с хромовым покрытием, сформированным электродеформационным плакированием гибким инструментом, в исходном состоянии и с последующим полированием соответственно

Fig. 5. Diagram of wear values for friction pairs with samples: 1 – uncoated; 2 – with electroplating chrome plating after grinding; 3 – with electroplated chrome plating after grinding and subsequent polishing; 4, 5 – with chrome plating formed by EDCFT in initial state and with subsequent polishing, respectively

Несколько больший износ имеют пары с плакированными полированными хромовыми покрытиями (рис 5, столбец 5). Для этих пар характерно то, что хотя износ дисков был и сопоставим с износом дисков с гальваническими неполированными покрытиями, износ их резиновых контробразцов оказался на $0,3 \cdot 10^{-3}$ г выше значений износа контробразцов пар с гальваническими неполированными покрытиями. У остальных пар трения, подвергнутых испытаниям, значения величин износа дисков и контробразцов заметно превышали предыдущие (рис. 5, столбцы 1, 3, 4).

ВЫВОДЫ

1. При формировании хромовых покрытий методом электродеформационного плакирования гибким инструментом на химический состав сформированных слоев, помимо элементного состава самого материала донора, влияет и материал ворса, из которого изготовлена проволочная щетка. В случае использования щеток с проволочным ворсом из нержавеющей стали 03X17H14M2 количество хрома и никеля в плакированном слое покрытия по процентному содержанию соответственно в 5,3 и 9,6 раза больше, чем в покрытии, сформированном щеткой из стали 65Г. При этом рельеф поверхности покрытия имеет развитую шероховатую структуру, состоящую из плотно уложенных и вытянутых в направлении вращения щетки различных по размерам микрочастиц хрома, а также сглаженных микровыступов и микроуглублений. Дефекты покрытия в виде несплошностей и отслоений отсутствуют.

2. Шероховатость поверхности плакированных покрытий до полировки ($Ra = 0,71-0,92$ мкм) и после полировки ($Ra = 0,32-0,51$ мкм) как по общему уровню, так и по разбросу значений величин параметра Ra выше, чем у гальванических неполированных ($Ra = 0,18-0,26$ мкм) и полированных ($Ra = 0,17-0,24$ мкм) хромовых покрытий. Однако, несмотря на повышенную шероховатость поверхности плакированных хромовых покрытий, по результатам триботехнических испытаний установлено, что пары трения с образцами с неполированными и полированными плакированными хромовыми покрытиями, сформированными методом электродеформационного плакирования гибким инструментом, обладают наименьшими значениями величин коэффициента трения скольжения,

чем пары с образцами с гальваническими неполированными и полированными покрытиями, а также пары без покрытия. Среднее значение величины коэффициента трения скольжения для трущихся пар составляло: 0,24 – для образцов без покрытия; 0,185 – для образцов с гальваническими неполированными покрытиями; 0,224 – для образцов с гальваническими полированными покрытиями; 0,031 и 0,023 – для образцов с плакированными неполированными и полированными покрытиями соответственно. Можно предположить, что снижению значений величин коэффициента трения скольжения у пар с образцами с плакированными хромовыми покрытиями способствует развитый микрорельеф их поверхности, характеризующийся наличием сглаженных микровыступов и микроуглублений (микрокарманов), которые повышают гидроемкость поверхностного слоя, лучше удерживают смазочный материал и в процессе фрикционного взаимодействия с контртелом обеспечивают возможность возникновения гидродинамического эффекта в зоне контакта. Однако, несмотря на низкие значения величин коэффициента трения скольжения у пар с плакированными хромовыми покрытиями, наименьший износ резиновых контробразцов отмечен у пар с гальваническими неполированными хромовыми покрытиями, т. е. обработанных только шлифованием.

3. По результатам исследований величин износа образцов установлено, что наименьший износ как дисков с покрытиями, так и резиновых контробразцов имеют пары трения с дисками с гальваническими неполированными хромовыми покрытиями. Для этих пар характерно то, что хотя износ дисков был и сопоставим с износом дисков с плакированными полированными покрытиями, износ их резиновых контробразцов оказался на $0,3 \cdot 10^{-3}$ г меньше значений величин износа контробразцов пар с плакированными полированными покрытиями.

4. Результаты проведенных исследований позволяют заключить, что технология формирования покрытий на основе хрома методом электродеформационного плакирования гибким инструментом, хотя и обладает определенными недостатками, главным из которых может оказаться повышенный износ контртел, выполненных из резины, однако в силу простоты ее реализации, малой энергоемкости и экологической чистоты вполне может быть использована в

промышленности для хромирования деталей гидроприводов.

5. Опытно-промышленная апробация и внедрение технологии электродеформационного плакирования гибким инструментом выполнены в ОАО «Минский завод автоматических линий имени П. М. Машерова». Покрытия из хрома, легированного УДАГ, были сформированы методом электродеформационного плакирования гибким инструментом на рабочих поверхностях штоков гидроцилиндров объемных гидроприводов гидравлического оборудования станков (рис. 6а). Испытания штоков с покрытием «хром + УДАГ» в составе гидроцилиндров проводили на Минском заводе автоматических линий имени П. М. Машерова на испытательном стенде (рис. 6б). В ходе испытаний установлено, что опытные гидроцилиндры полностью соответствуют предъявляемым техническим требованиям и пригодны для эксплуатации в составе гидроприводов станков.

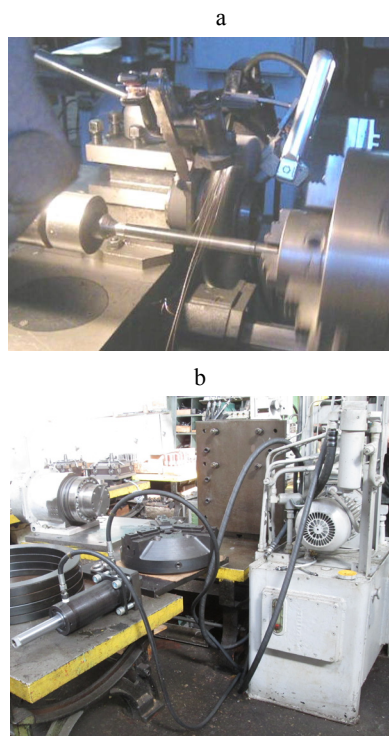


Рис. 6. Формирование покрытия «хром + УДАГ» методом электродеформационного плакирования гибким инструментом на рабочих поверхностях штока гидроцилиндра (а) и проверка функционирования штока с покрытием в составе гидроцилиндра (б)

Fig. 6. Formation of “chromium + ultradispersed detonation diamond graphite charging material” coating by EDCFT method on working surfaces of hydraulic cylinder rod (а) and checking of rod operation with coating in composition of cylinder (b)

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЭДПИГ (EDCFT) – электродеформационное плакирование гибким инструментом (electrodeformation cladding with a flexible tool);

УДАГ (UDDG) – ультрадисперсная алмазно-графитовая шихта (ultradispersed diamond-graphite mixture);

ВМЩ (RMB) – вращающаяся металлическая щетка (rotary metal brush);

$f_{тр}$ ($f_{р}$) – коэффициент трения скольжения (coefficient of sliding friction);

Δm (Δm) – весовой износ (weight wear).

ЛИТЕРАТУРА

1. Свешников, В. К. Станочные гидроприводы: справочник / В. К. Свешников. М.: Машиностроение, 2004. 512 с.
2. Гидроцилиндры: учеб.-метод. пособие / Д. Ю. Воронов [и др.]. Тольятти: ТГУ, 2011. 72 с.
3. Беленький, М. А. Электроосаждение металлических покрытий: справ. / М. А. Беленький, А. Ф. Иванов. М.: Металлургия, 1985. 288 с.
4. Фаличева, А. И. Экологические проблемы хромирования и альтернативного покрытия / А. И. Фаличева, Ю. А. Стекольников, Н. И. Глянец // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естеств. и техн. науки. 1999. Т. 4, вып. 2. С. 256–257.
5. Перспективы замены гальванического хромирования гиперзвуковой металлизацией / М. А. Белоцерковский [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А. А. Дюжев [и др.]. 2014. Вып. 3. С. 324–328.
6. Verstak, A. Activated Combustion HVAF Coatings for Protection against Wear and High Temperature Corrosion / A. Verstak, V. Baranovski // Thermal Spray 2003. Advancing the Science and Applying the Technology: Proceedings of the 2003 International Thermal Spray Conference, 5–8 May 2003 Orlando, Florida, USA, Ohio, 2003. P. 535–541.
7. Пилюшина, Г. А. Состояние и пути повышения работоспособности гидропривода лесозаготовительных машин / Г. А. Пилюшина, С. В. Тяпин // Автотракторостроение-2009: Междунар. науч. симпозиум (Москва). М.: МГТУ «МАМИ», 2009. Кн. 1. С. 452–455.
8. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / П. П. Лезин [и др.]. Саранск: Красный Октябрь, 2003. 504 с.
9. Raykis, O. High-Speed Laser Metal Deposition Replaces Hard Chrome Plating / O. Raykis // Laser Technik Journal. 2017. No 1. P. 28–30.
10. Белевский, Л. С. Фрикционный и электрофрикционный способы нанесения покрытий / Л. С. Белевский, И. В. Белевская // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2012. № 38. С. 158–163.
11. Износостойкость легированных хромовых покрытий, сформированных способом деформационного плакирования с электрическим напряжением / М. А. Леван-

цевич [и др.]. Минск, 2017. // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С. Н. Поддубко [и др.]. 2017. Вып. 6. С. 159–162.

12. Борисов, Г. А. Технологические основы повышения ресурса штокового узла гидроцилиндра / Г. А. Борисов, Е. Е. Семенова, В. Ю. Чикунков // Вестник РГАТУ. 2010. № 2. С. 44–50.
13. Шнейдер, Ю. Г. Влияние шероховатости металлической поверхности на трение в гидроуплотнительных парах возвратно-поступательного движения / Ю. Г. Шнейдер, А. Л. Рейнус // Вестник машиностроения. 1970. № 5. 19–20.
14. Проволоцкий, А. Е. Технологические методы повышения долговечности деталей гидромашин / А. Е. Проволоцкий, С. П. Лапшин, С. Л. Негруб // Промислова гідравліка і пневматика. 2004. Т. 4, вып. 2. С. 68–71.

Поступила 01.04.2019

Подписана в печать 11.06.2019

Опубликована онлайн 30.09.2019

REFERENCES

1. Sveshnikov V. K. (2004) *Machine Hydraulic Drive*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 512 (in Russian).
2. Voronov D. Yu., Voloskov V. V., Drachev A. O., Boichenko O. V. (2011) *Hydraulic Cylinders*. Tolyatti, Togliatti State University. 72 (in Russian).
3. Belenkii M. A., Ivanov A. F. (1985) *Electrodeposition of Metal Coatings*. Moscow, Metallurgiya Publ. 288 (in Russian).
4. Falicheva A. I., Stekolnikov Yu. A., Glyantsev N. I. (1999) Ecological Problems of Chroming and Alternative Coating. *Vestnik Tambovskogo Universiteta. Seriya Estestvennye i Tekhnicheskie Nauki = Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 4 (2), 256–257 (in Russian).
5. Belotserkovsky M. A., Sosnovsky A.V., Grigorich A. N., Prjadko A. S., Cherepko A. E. (2014) Prospects of Substitution of the Galvanic Chromium Coating by Hypersonic Metallization. *Aktual'nye Voprosy Mashinovedeniya: Sb. Nauch. Tr.* [Pertinent Issues in Mechanical Engineering: Collection of Research Papers]. Minsk, (3), 324–328 (in Russian).
6. Verstak A., Baranovski V. (2003) Activated Combustion HVOF Coatings for Protection Against Wear and High Temperature Corrosion. *Thermal Spray 2003. Advancing the Science and Applying the Technology: Proceedings of the 2003 International Thermal Spray Conference*, 5–8 May 2003 Orlando, Florida, USA, Ohio, 535–541.
7. Pilyushina G. A., Tyapin S. V. (2009) State and Approaches for Improvement of Hydrodrive Performance in Tree Harvesting Machines. *"Avtotraktorostroenie-2009", Mezhdunarodnyi Nauchnyi Simpozium (Moskva). Kniga 1* ["Autotractor-building-2009", International Scientific Symposium (Moscow). Book 1]. Moscow, Moscow State Technical University "MAMI", 452–455 (in Russian).
8. Lezin P. P., Senin P. V., Ivanov V. I., Velichko S. A., Ionov P. A. (2003) *Electric Spark Technologies for Reconditioning and Strengthening of Machine Parts and Tools (Theory and Practice)*. Saransk, Krasny Oktyabr Publ. 504 (in Russian).
9. Raykis O. (2017) High-Speed Laser Metal Deposition Replaces Hard Chrome Plating. *Laser Technik Journal*, (1), 28–30. <https://doi.org/10.1002/latj.201700006>.
10. Belevskii L. S., Belevskaya I. V. (2012) Friction and Electric-Friction Methods for Coating Deposition. *Obrabotka Sploshnykh i Sloistykh Materialov* [Processing of Solid and Multi-Layer Materials], (38), 158–163 (in Russian).
11. Levantsevich M. A., Pilipchuk E. V., Sheleg V. K., Kalach V. N. (2017) Wear Resistance of Alloy Chrome Platings Formed while Using Method of Deformative Cladding with Electric Voltage. *Aktual'nye Voprosy Mashinovedeniya: Sb. Nauch. Tr.* [Pertinent Issues in Mechanical Engineering: Collection of Research Papers]. Minsk, (6), 159–162 (in Russian).
12. Borisov G. A., Semenova E. E., Tchikunkov V. Yu. (2010) Technique for Improvement of Resource in Rod Unit of Hydrocylinder. *Vestnik Ryazanskogo Gosudarstvennogo Agrotekhnologicheskogo Universiteta imeni P. A. Kostycheva = Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev*, (2), 44–50 (in Russian).
13. Shneider Yu. G., Reynus A. L. (1970) Influence of Metallic Surface Roughness on Friction in Hydraulic Sealing Pairs of Backward and Forward Action. *Vestnik Mashinostroyeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], (5), 19–20 (in Russian).
14. Provolotsky A. E., Lapshin S. P., Negrub S. L. (2004) Technological Methods for Improvement of Longevity in Hydraulic Machine Parts. *Promislova Hidravlika i Pnevmatika = Industrial Hydraulics and Pneumatics*, 4 (2), 68–71 (in Russian).

Received: 01.04.2019

Accepted: 11.06.2019

Published online: 30.09.2019