

УДК 621.9.07

<sup>1</sup>Л.С. Белевский, <sup>2</sup>Е.Л. Юреть, <sup>3</sup>М.А. Леванцевич, <sup>2</sup>Е.В. Пилипчук, <sup>1</sup>Р.Р. Дема  
(<sup>1</sup>Магнитогорский государственный университет им. Г.И. Носова,  
<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск,  
<sup>3</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск)  
E-mail: demarr78@mail.ru

## Исследование структуры и свойств хромовых покрытий, нанесенных методом электрофрикционного плакирования гибким инструментом\*

*Приведены результаты исследований микроструктур хромовых покрытий, сформированных электрофрикционным плакированием. Показано, что сформированное хромовое покрытие не имеет видимых границ внутри покрытия, однородно по структуре и без деформированной зоны под покрытием. Результаты триботехнических испытаний образцов с хромовым покрытием показали, что при дополнительном модифицировании поверхности слоем фторопласта коэффициент трения снижается в 1,5 раза.*

**Ключевые слова:** плакирование, покрытие, износостойкость, испытание.

*Results of researches of microstructures of the chromium coatings created by electrofrictional cladding are presented. It is shown that the created chromic coating has no visible borders in coating, it is uniform in structure and without the deformed zone under coating. Results of tribotechnical models of test with chromium coating have shown what at additional modifying of surface layer of the fluoroplastic occurs to decrease in coefficient of friction by 1.5 times.*

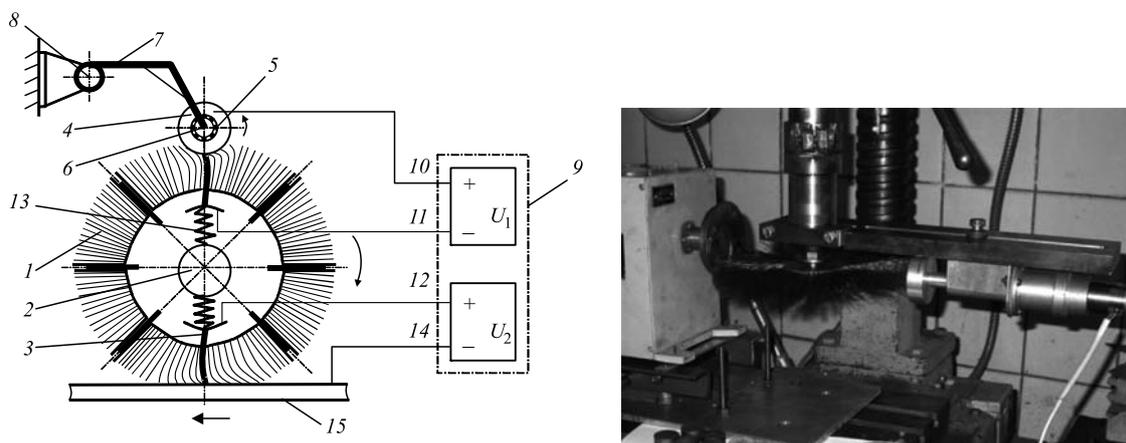
**Keywords:** cladding, coating, wear resistance, test.

### Введение

Нанесение защитных покрытий на рабочие поверхности деталей триботехнического назначения — эффективный технологический прием, используемый для повышения работоспособности узлов трения машин и механизмов. Одним из них является достаточно простой в реализации, мало энерго- и металлоемкий, экологически чистый и высокопроизводительный метод обработки изделий — метод деформационного плакирования гибким инструментом (ДПГИ), где в качестве гибкого инструмента используется вращающаяся металлическая щетка (ВМЩ) с проволочным ворсом [1—5].

Опыт практического применения метода ДПГИ на промышленных предприятиях показал, что, несмотря на свою высокую эффективность, он имеет и ряд существенных недостатков. К их числу следует отнести малую толщину формируемых слоев покрытия, ограниченный перечень наносимых материалов, невозможность формирования покрытий из твердых и тугоплавких материалов и др. В этой связи в целях устранения указанных недостатков и расширения технологических возможностей метода предложено процесс плакирования осуществлять с подачей электрического напряжения в зону контакта ворса щетки с материалом-донором и поверхностью детали. По этой причине способ назван электрофрикционным плакированием [6]. Общий вид изготовленного устройства для электрофрикционного плакирования приведен на рис. 1.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-38-50226 "мол\_нр".



**Рис. 1. Устройство для формирования покрытий методом электрофрикционного плакирования:**

1 — металлическая щетка, выполненная в виде электрически изолированных друг от друга секторов; 2 — вал привода вращения (на рисунке показан условно); 3 — пластины из нихрома; 4 — элемент из материала покрытия; 5 — упорный узел; 6 — ось; 7 — кронштейн; 8 — ось; 9 — генератор импульсов; 10—12, 14 — вывод; 13 — токо-съемник; 15 — поверхность детали

В современном машиностроении широкое применение получили покрытия на основе хрома. Их используют для защиты от коррозии и износа различных деталей машин, станков и технологического оборудования. Наиболее широко подобные покрытия применяют для хромирования деталей гидравлических систем (штоков и рабочих поверхностей гидроцилиндров, плунжерных пар и др.) [7]. Как правило, для формирования хромовых покрытий используют технологии гальванического осаждения, которые обеспечивают получение качественных покрытий. Однако одну из серьезных проблем при их реализации представляют дорогостоящая очистка и последующая утилизация отработанных электролитов. Поэтому авторы предлагают провести нанесение покрытий на основе хрома с применением метода электрофрикционного плакирования гибким инструментом.

### Методика проведения эксперимента

Для испытаний были подготовлены образцы в виде плоских дисков из стали 40Х диаметром 71 мм и толщиной 5 мм, твердостью 50 НРС.

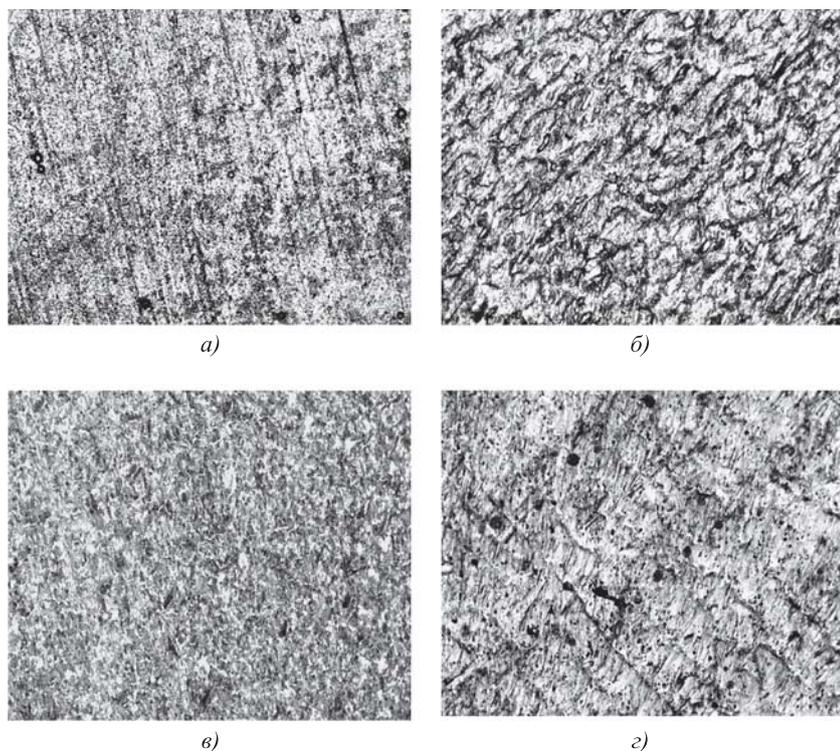
На плоских поверхностях дисков методами гальванического осаждения и электрофрикционного плакирования формировали покрытия на основе хрома. Часть дисков после формирования хромового покрытия электрофрикционным плакированием была подвергнута обработке обычным деформационным плакированием с нанесением поверх слоя хрома покрытий из фторопласта Ф-4 и баббита Б83.

При формировании покрытия методом электрофрикционного плакирования использовали металлическую щетку с восьмью нихромовыми пластинами-вставками диаметром 200 мм, с вылетом ворса 60 мм. Линейная скорость вращения щетки составляла 35 м/с, значение натяга ворса щетки — 1,2 мм, число проходов — 6. Напряжение и сила тока, подаваемые на материал-донор и вставные нихромовые пластины, составляли 40 В и 90 А соответственно. Положительный полюс подводили к металлу покрытия, а отрицательный — к вставным нихромовым пластинам.

Для формирования покрытий из фторопласта Ф-4 и баббита Б83 обычным деформационным плакированием использовали цилиндрическую щетку с проволочным ворсом (200×10×22 мм), с диаметром и вылетом ворса соответственно 0,2 и 60 мм. Линейная скорость вращения щетки от 25 до 30 м/с, значение натяга ворса щетки — 0,5...1,0 мм, число проходов — 6.

Толщина слоя хромовых покрытий составляла 12...15 мкм. Толщина двухслойных покрытий хром—фторопласт Ф-4 и хром—баббит Б83 составляла 18...20 мкм.

Структура сформированного покрытия приведена на рис. 2. Стальные поверхности после нанесения хромового покрытия электрофрикционным плакированием приобретают белый, характерный хрому цвет, а микроструктура покрытия на уровне оптической микроскопии указывает на то, что покрытие толщиной до 10...15 мкм формируется ровным слоем, без видимых границ внутри покрытия, с однородной структурой и без деформированной зоны под покрытием.



**Рис. 2. Микроструктура поверхности образцов с покрытием на основе хрома на образцах из стали 40X ( $\times 100$ ):**

*а* — с гальваническим хромовым покрытием; *б* — с электрофрикционно-плакированным хромовым покрытием; *в* — с электрофрикционно-плакированным хромовым покрытием с нанесенным поверх слоем фторопласта Ф-4; *г* — с электрофрикционно-плакированным хромовым покрытием с нанесенным поверх слоем баббита Б83

### Исследование триботехнических характеристик сформированных покрытий

Испытания подготовленных образцов проводили в режиме "сухого трения" (без смазочного материала) на специальном испытательном стенде, представленном на рис. 3.

В качестве контрольных образцов использовали цилиндрические ролики диаметром 6 мм и длиной 12 мм, изготовленные из маслостойкой резины с модулем упругости 15 МПа.

Износ роликов и дисков оценивали по убыли их массы на аналитических весах ВЛР-200 с точностью до 0,00001 г.

Диски с покрытием и без покрытия подвергали сравнительным испытаниям на трение и изнашивание на машине трения одностороннего вращения, реализующей трение резинового индентора по плоской поверхности диска (рис. 4). Частота вращения диска составляла  $7,3 \text{ мин}^{-1}$ , относительная скорость скольжения индентора по диску —  $0,011...0,019 \text{ м/с}$ , удельная нагрузка —  $0,5 \text{ МПа}$ . В ходе испытаний регистрировали коэффициент

трения скольжения  $f_{\text{тр}}$  между трущимися образцами, а также износ индентора и диска, определяемый весовым методом. Время испытаний варьировалось от 50 до 70 мин для обеспечения пути трения, соответствующего 45 м.

### Результаты исследований и их обсуждение

Результаты триботехнических испытаний показали, что хромовое покрытие, сформированное электрофрикционным плакированием, имеет наибольший коэффициент трения скольжения  $f_{\text{тр}} = 0,90...0,92$  (см. рис. 4, образец № 3) по сравнению с другими образцами. Это объясняется тем, что указанное покрытие имело более высокое значение параметра шероховатости ( $Ra = 1,25 \text{ мкм}$ ) поверхности, что обусловило повышенную сопротивляемость сдвиговым нагрузкам, возникающим в результате трения образцов.

Минимальный коэффициент трения скольжения ( $0,42...0,45$ ) имел образец с электрофрикционно-плакированным покрытием с нанесенным поверх слоем фторопласта Ф-4 (см. рис. 4, образец № 4). Нанесение слоя фторопла-



**Рис. 3. Машина трения для проведения триботехнических испытаний**

ста обеспечило улучшение шероховатости плакированного хромового покрытия. В результате плакирования с нанесением слоя фторопласта произошло сглаживание поверхности хромового покрытия. При этом частички фторопласта заполнили все микроуглубления между частичками хрома, обеспечив тем самым гладкую ровную поверхность (см. рис. 2, в).

То же самое имело место и при нанесении слоя баббита Б83, однако значение коэффициента трения  $f_{тр}$  составило 0,60...0,62, что в среднем в 1,4 раза выше, чем у двухслойного покрытия хром—фторопласт Ф-4. В данном случае это можно объяснить тем, что фторопласт Ф-4, по сравнению с баббитом Б83, обладает лучшими триботехническими свойствами.

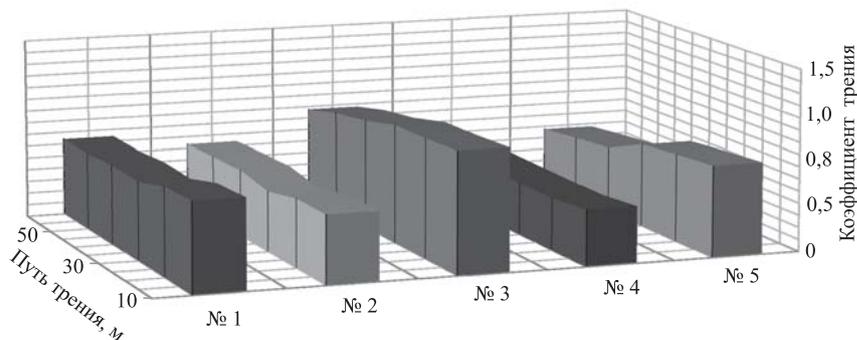
Значения  $f_{тр}$  у образцов с гальваническим хромовым покрытием и без покрытия составили в среднем 0,68 и 0,54 соответственно.

Анализ данных по износу образцов (рис. 5) позволяет заключить, что резиновые контрообразцы при трении по дискам с гальваническим хромовым покрытием и без покрытия (см. рис. 5, образцы № 1, 2) практически не изнашиваются. Имеет место только износ дисков.

Незначительный износ подобных контрообразцов наблюдается и при трении по диску с двухслойным покрытием хром—баббит Б83 (см. рис. 5, образец № 5). В данном случае износ диска значительно превышает износ контрообразца.

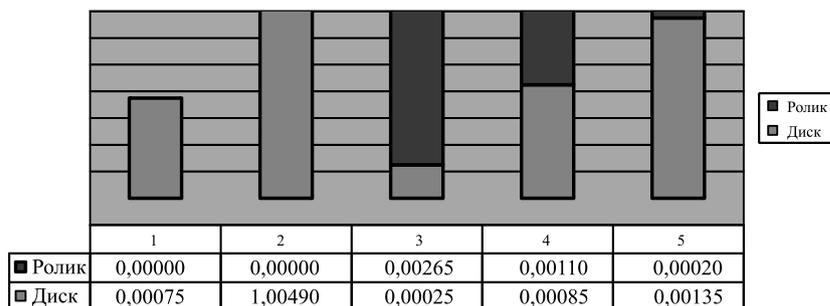
Максимальный износ резиновых контрообразцов наблюдался при трении по диску с электрофрикционно-плакированным хромовым покрытием (см. рис. 5, образец № 3). Это объясняется тем, что вследствие высокой шероховатости и твердости поверхности диска с хромовым покрытием в процессе трения резиновый контрообразец интенсивно истирается, в то время как изнашивание диска протекает в значительно меньшей степени. При этом износ диска был меньше износа других образцов.

Истирание резинового контрообразца наблюдалось и при трении по диску с двухслойным покрытием хром—фторопласт (см. рис. 5, образец



**Рис. 4. Экспериментальные зависимости коэффициента трения скольжения резинового контрообразца по поверхности образца с покрытием от пути трения:**

№ 1 — образец с гальваническим хромовым покрытием; № 2 — образец без покрытия; № 3 — образец с электрофрикционно-плакированным покрытием; № 4 — образец с электрофрикционно-плакированным покрытием с нанесенным поверх слоем фторопласта Ф-4; № 5 — образец с электрофрикционно-плакированным покрытием с нанесенным поверх слоем баббита Б83



**Рис. 5. Зависимость весового износа, г, дисков с хромовым покрытием и резиновых контрообразцов:**

№ 1 — образец с гальваническим хромовым покрытием; № 2 — образец без покрытия; № 3 — образец с электрофрикционно-плакированным покрытием; № 4 — образец с электрофрикционно-плакированным покрытием с нанесенным поверх слоем фторопласта Ф-4; № 5 — образец с электрофрикционно-плакированным покрытием с нанесенным поверх слоем баббита Б83

№ 4). В данном случае, несмотря на относительно невысокие значения  $f_{тр}$ , наблюдался износ как контрообразца, так и диска.

### Выводы

1. Исследована структура хромовых покрытий, сформированных электрофрикционным плакированием. Установлено, что сформированное электрофрикционным способом хромовое покрытие не имеет видимых границ внутри покрытия, однородно по структуре и без деформированной зоны под покрытием.

Внешняя поверхность покрытия состоит из мелких и крупных частиц подплавленного хрома, хаотично разбросанных по поверхности, что обуслав-

ливаает повышенную шероховатость поверхности. Параметр шероховатости  $Ra$  у образца с хромовым покрытием, сформированным электрофрикционным плакированием, составляет 1,25 мкм, что на 30 % выше, чем у образцов без покрытия и с хромовым покрытием, сформированным гальваническим осаждением.

2. Разработана методика, изготовлены экспериментальные образцы деталей с хромовым покрытием и проведены их триботехнические испытания, где в качестве контробразца использовали ролики (инденторы), изготовленные из маслостойкой резины с модулем упругости 15 МПа, а условия испытаний соответствовали условиям работы резиновых манжет в уплотнениях валов мобильных машин и технологического оборудования.

Установлено, что хромовые покрытия, сформированные электрофрикционным плакированием без последующей финишной обработки шлифованием, обладают худшими триботехническими свойствами, чем гальванические хромовые покрытия со шлифовкой поверхности.

Модифицирование поверхности электрофрикционно-плакированных хромовых покрытий с дополнительным нанесением слоя фторопласта Ф-4 способствует снижению (до значений 0,42...0,45) коэффициента трения скольжения в 1,5 раза, по сравнению с образцом с гальваническим хромовым покрытием и без покрытия. Однако, несмотря на значительное снижение коэффициента трения, суммарный износ резинового контробразца и диска с двухслойным покрытием хром — фторопласт Ф-4 выше, чем у аналогичных образцов с гальваническим покрытием.

3. Модифицирование поверхности электрофрикционно-плакированных хромовых покры-

тий дополнительным нанесением слоя баббита Б83 не дает существенных преимуществ по сравнению с образцами с гальваническими хромовыми покрытиями и без покрытий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Белевский Л.С.** Пластическое деформирование поверхностного слоя и формирование покрытия при нанесении гибким инструментом. Магнитогорск: Магнитогор. лицей РАН, 1996. 230 с.
2. **Анцупов В.П.** Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. 241 с.
3. **Белевский Л.С., Кадошников В.И., Плотников Г.В.** Поверхностное упрочнение металлическими щетками // Вестник машиностроения. 1987. № 10. С. 24—26.
4. **Расширение** технологических возможностей метода плакирования гибким инструментом / В.И. Кадошников и др. // Вестник машиностроения. 2003. № 10. С. 64—66.
5. **Завалишин А.Н.** Механизм образования покрытий, сформированных во фрикционном контакте // Трение и износ. 2001. Т. 22. № 2. С. 197—202.
6. **Белевский Л.С., Белевская И.В.** Фрикционный и электрофрикционный способы нанесения покрытий // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. М.В. Чукина. Вып. 38. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. С. 158—163.
7. **Пат. 2138579 РФ, МПК<sup>6</sup> С 23 С 26/00.** Способ упрочнения деталей с одновременным нанесением композиционных покрытий. Самарский государственный технический университет. № 97116694/02; заявл. 07.10.97; опубл. 27.09.99.