

УДК 621.793

М.А. ЛЕВАНЦЕВИЧ, Н.Н. МАКСИМЧЕНКО, кандидаты техн. наук  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

Е.В. ПИЛИПЧУК

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Л.Л. СОТНИК

Барановичский государственный университет, Республика Беларусь

## ВЫБОР МАТЕРИАЛА ВОРСА ПРОВОЛОЧНОЙ ЩЕТКИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПЛАКИРОВАНИЯ

*Установлено, что при формировании методом деформационного плакирования гибким инструментом (ДПГИ) хромовых покрытий, легированных наноразмерной алмазнографитной шихтой УДАГ, с использованием щетки с проволочным ворсом из стали 65Г обеспечивается параметр шероховатости поверхности  $Ra = 0,25...0,35$  мкм, однако при этом толщина слоя сформированного покрытия составляет всего 3...5 мкм, что может не удовлетворять требованиям по обеспечению коррозионной стойкости покрытий. При формировании композиционных хромовых покрытий щетками с проволочным ворсом из нержавеющей стали 03X17H14M2 толщина слоя составляет 10...12 мкм, что может обеспечить сравнительно неплохую коррозионную стойкость, однако повышенная шероховатость поверхности покрытия  $Ra = 0,8...1,0$  мкм может стать причиной интенсивного изнашивания герметизирующих резиновых манжет. Поэтому для снижения шероховатости поверхности в этом случае требуется введение дополнительной операции полировки сформированного покрытия. Промышленная апробация технологии ДПГИ, проведенная в ОАО «Минский завод автоматических линий им. П.М. Машерова», подтвердила целесообразность использования щетки с ворсом из нержавеющей стали 03X17H14M2 для хромирования штоков гидроцилиндров металлорежущих станков.*

**Ключевые слова:** деформационное плакирование, гибкий инструмент, вращающаяся металлическая щетка, покрытие, шток гидроцилиндра, толщина покрытия, шероховатость

**Введение.** В гидроцилиндрах возвратно-поступательного движения, нашедших широкое применение в гидроприводах различных механических систем, для герметизации подвижного штока используют манжетные резиновые уплотнения. Для обеспечения надежной герметизации сопряжения «шток — резиновая манжета», а также защиты от коррозии и износа поверхность штока подвергают гальваническому хромированию [1]. Однако, учитывая вредность гальванических производств, а также их высокую энергоемкость и низкую эффективность, особенно при формировании хромовых покрытий на поверхностях деталей, изготавливаемых, например, на предприятиях мелкосерийного и индивидуального производств, активно проводится поиск новых технологий, альтернативных гальваническому хромированию [2–5]. К их числу относят технологии гиперзвуковой металлизации, газотермического и плазменного напыления, электроискрового и лазерного легирования и др. Известны положительные примеры их применения, однако широкого промышленного применения подобные технологии пока не получили в силу ряда причин, главными из которых являются высокая стоимость используемого оборудования и необходимость привлечения высококвалифицированных специалистов для его обслуживания.

В последние годы активно развивается сравнительно недорогая, малозатратная и экологически чистая технология, основанная на методе ДПГИ, при котором слой покрытия на поверхности детали формируется за счет переноса ворсом вращающейся металлической щетки (ВМЩ) частичек материала покрытия (донора). Установлено, что хромовые покрытия, сформированные с использованием технологии ДПГИ из доноров, полу-

ченных путем спекания смеси порошков чистого хрома и наноразмерной алмазнографитной шихты УДАГ (ТУ РБ 28619110.001-95) производства фирмы «Синта» (Республика Беларусь), в режиме «сухого» трения с резиновым контробразцом имеют триботехнические характеристики, сопоставимые с гальваническими хромовыми покрытиями [6], а в режиме граничного трения подобные покрытия обеспечивают коэффициент трения скольжения в установившемся режиме, равный 0,023–0,025, что в среднем в 7,5 раза ниже, чем у хромовых покрытий, полученных гальваническим осаждением [7]. При этом в ходе проводимых испытаний покрытий, сформированных с использованием технологии ДПГИ, было выявлено, что определенное влияние на качество формируемых слоев хромовых покрытий может оказывать материал проволочного ворса ВМЩ.

**Цель исследований** заключалась в изучении структурно-фазового состава и параметров шероховатости поверхности слоев хромовых покрытий для последующего выбора материала проволочного ворса ВМЩ при формировании покрытий с использованием технологии ДПГИ.

**Методика исследований.** Структурно-фазовые исследования и оценка параметра шероховатости поверхности  $Ra$  проводились на образцах размером 10×6×2 мм, выполненных из стали 45 (HRC 43...45), с хромовым покрытием, сформированным из донора, полученного методами порошковой металлургии путем спекания смеси порошков чистого хрома и наноразмерной алмазнографитной шихты УДАГ (не более 1 мас. %). Деформационное плакирование осуществлялось поочередно вращающимися металлическими щетками с гофрированным ворсом, выполненным из стали 65Г и нержавеющей стали 03X17H14M2 (производства фирмы OSBORN).

Диаметр и ширина щетки составляли 200 и 30 мм соответственно, линейная скорость вращения — 30 м/с, диаметр и вылет ворса — 0,2 и 40 мм соответственно, число проходов щетки по поверхности образцов — 6.

Для повышения достоверности результатов испытаний было обработано по 3 образца с применением каждой из щеток.

После обработки среднее значение толщины сформированного слоя покрытия, измеренной с помощью прибора МТЦ-3, составило 3...5 мкм для покрытий, сформированных щеткой с ворсом, выполненным из стали 65Г, и 10...12 мкм — для покрытий, сформированных щеткой с ворсом из нержавеющей стали 03X17H14M2.

Среднее значение параметра шероховатости поверхности  $Ra$  покрытий измеряли с помощью профилографа-профилометра производства завода «Калибр» (г. Минск). После нанесения покрытия параметр  $Ra$  составил 0,25...0,35 мкм для образцов, обработанных щеткой с ворсом из стали 65Г, и 0,8...1,0 мкм — для образцов, обработанных щеткой с ворсом из нержавеющей стали 03X17H14M2.

Для металлографического анализа поверхностных слоев образцов, подвергнутых деформационному плакированию, использовался инвертированный микроскоп

Альтами МЕТ 1МТ. Травление микроструктуры шлифов проводилось с использованием реактива Куррана (50 мл HCl, 10 г CuSO<sub>4</sub>, 50 мл H<sub>2</sub>O), а также реактива Марбле (50 мл HCl, 2 г CuSO<sub>4</sub>, 50 мл C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, 50 мл H<sub>2</sub>O).

Рентгеноструктурный анализ исследуемых образцов выполняли на дифрактометре ДРОН 3.0 в монохроматизированном CoK<sub>α</sub> излучении при ускоряющем напряжении 30 кВ и анодном токе 15 мА. Рентгеновская съемка осуществлялась с фокусировкой по Бреггу–Брентано в режиме сканирования (по точкам) с шагом 0,1° и временем набора импульсов на точку, равным 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 DiffraPlus EVA.

**Результаты испытаний.** Изучение морфологии поверхности хромовых покрытий показало (рисунок 1), что рельеф поверхности, в особенности у покрытий, сформированных щеткой из нержавеющей стали 03X17H14M2 (см. рисунок 1 б), имеет развитую шероховатую структуру, состоящую из плотно уложенных

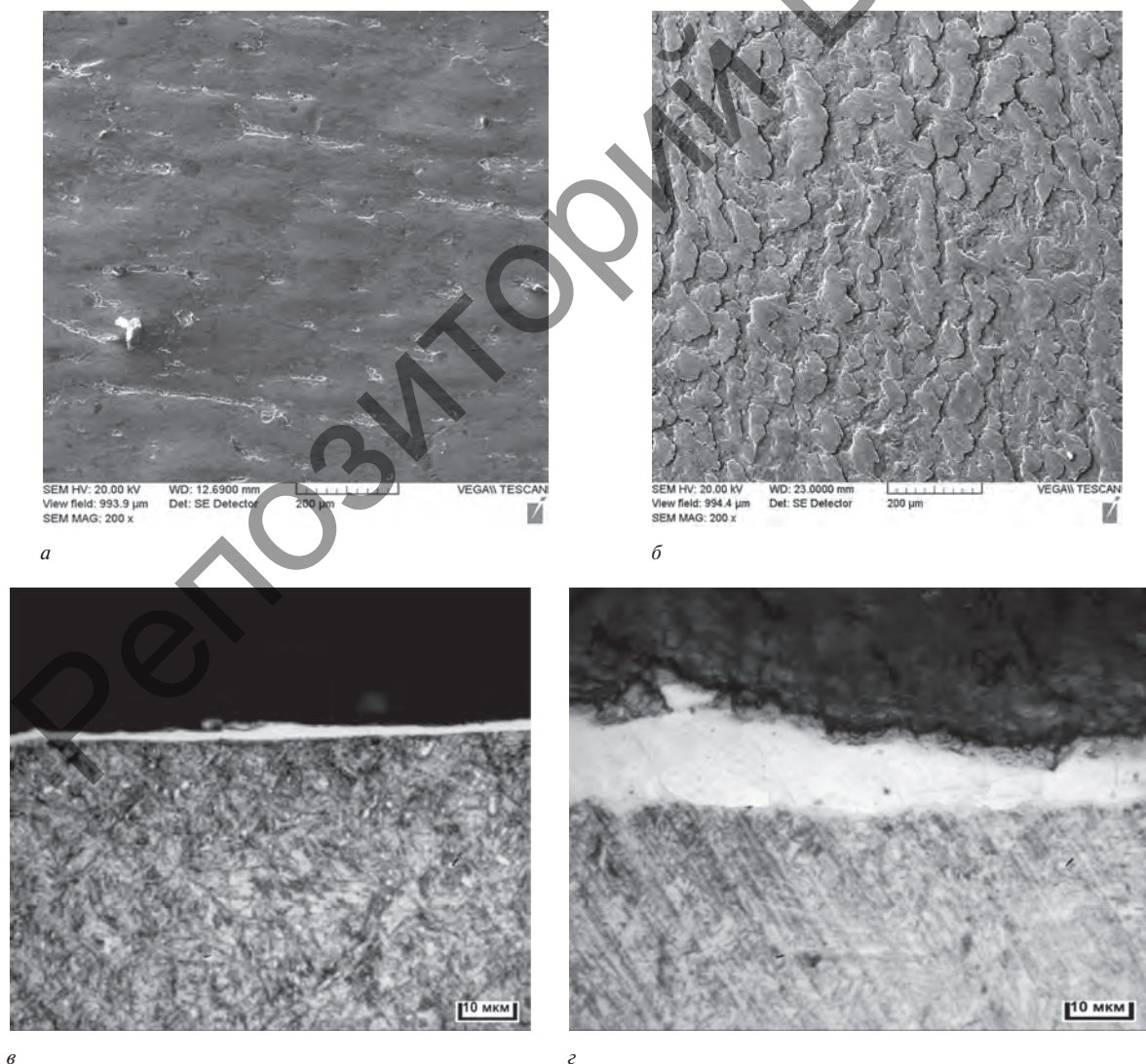


Рисунок 1 — Фото рельефа поверхности (а, б) и микроструктуры (в, г) образца из стали 45 с хромовым покрытием, сформированным методом ДППИ

и вытянутых в направлении вращения щетки различных по размерам микрочастиц хрома. Дефекты покрытия в виде несплошностей и «островковости» отсутствуют. Между слоем хромового покрытия и основой наблюдается граница раздела без видимых признаков наличия промежуточного слоя (см. рисунок 1 в, з).

Исследование структуры и фазового состава плакированных слоев хромовых покрытий выявило присутствие в них аустенита и хрома (рисунок 2, таблица). Период кристаллической решетки плакированного хрома составляет 0,2884 нм. При этом количество хрома и никеля в плакированном слое покрытия, сформированном щеткой с ворсом из нержавеющей стали 03X17H14M2, по процентному содержанию выше в 5,3 и 9,6 раза соответственно, чем в покрытии, сформированном щеткой с ворсом из стали 65Г (см. таблицу).

Образование аустенита в поверхностных слоях плакированных образцов, а также повышенное содержание хрома и никеля в покрытии, сформированном щеткой с ворсом из нержавеющей стали 03X17H14M2, свидетельствуют о том, что в процессе ДПГИ наряду с частичками материала донора в состав хромового покрытия переносятся также и элементы проволочного ворса щетки.

Технология формирования хромовых покрытий на штоках гидроцилиндров металлорежущих станков с использованием метода ДПГИ прошла успешную апробацию и внедрена в ОАО «Минский завод автоматических линий им. П.М. Машерова». В ходе ее отработки было признано целесообразным для формирования хромовых покрытий применять в качестве гибкого инструмента щетку с проволочным ворсом из нержавеющей стали 03X17H14M2.

**Заключение.** Результаты экспериментальных исследований позволяют заключить, что на толщину, структурно-фазовый состав и шероховатость поверхности слоев хромовых покрытий, сформированных методом деформационного плакирования гибким инструментом из доноров, полученных путем спекания смеси порошков чистого хрома и наноразмерной алмазографитной шихты УДАГ, существенное влияние оказывает материал проволочного ворса ВМЩ, используемой в качестве гибкого инструмента.

С точки зрения практического применения технологии ДПГИ для хромирования штоков гидроцилиндров результаты выполненных исследований показывают следующее:

- при формировании легированных УДАГ хромовых покрытий щетками с проволочным ворсом из углеродистой стали 65Г обеспечивается параметр шероховатости поверхности  $Ra$ , равный 0,25...0,35 мкм, что, согласно многим литературным источникам, вполне допустимо; однако при этом достижимая толщина слоя сформированного покрытия составляет всего 3...5 мкм, что может не удовлетворять требованиям по обеспечению коррозионной стойкости покрытий;
- в случае использования щеток с проволочным ворсом из нержавеющей стали 03X17H14M2 значения величины толщины слоя достигают 10...12 мкм, а параметра шероховатости поверхности  $Ra$  — 0,8...1,0 мкм.

Увеличение толщины слоя и параметра шероховатости поверхности  $Ra$  хромовых покрытий, сформированных щеткой с ворсом из нержавеющей стали 03X17H14M2, связано с привнесением частиц материала проволочного ворса в слой покрытия. Об этом свидетельствует повышенное содержание в сформированном

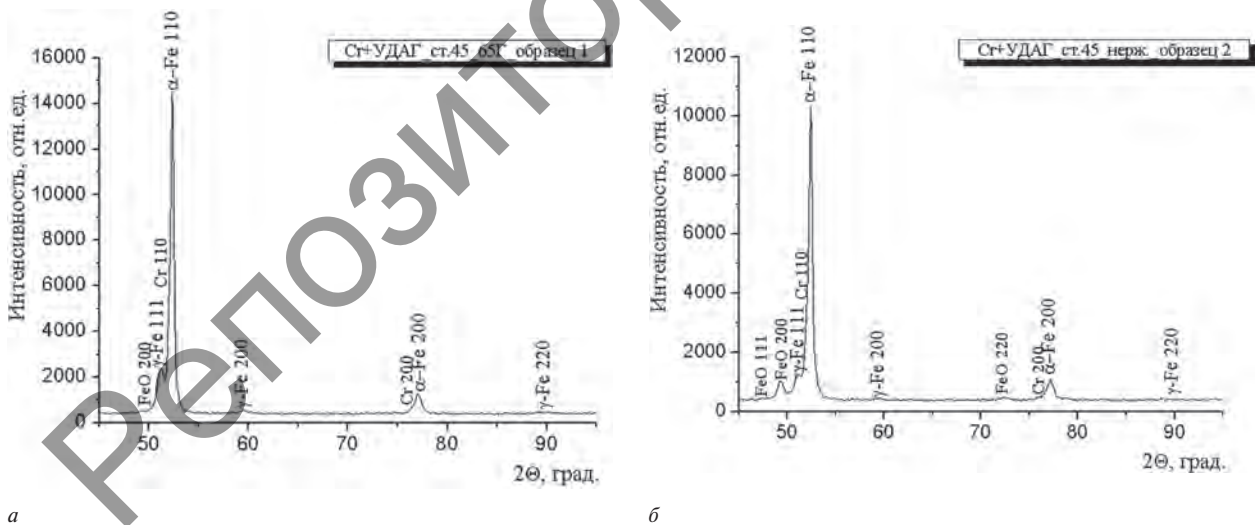


Рисунок 2 — Фрагменты рентгеновских дифрактограмм хромовых покрытий, сформированных методом ДПГИ на поверхности образца из стали 45 с использованием металлических щеток с ворсом из стали 65Г (а) и нержавеющей стали 03X17H14M2 (б)

Таблица — Химический состав хромовых покрытий, сформированных на поверхностях образцов из стали 45 методом ДПГИ с использованием ВМЩ с ворсом из стали 65Г (1) и нержавеющей стали 03X17H14M2 (2)

№ образца		Al	Si	P	S	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Mo	Fe
1	покрытие	—	0,441	0,06	0,016	0,506	0,556	0,181	0,153	0,02	—	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	0,66	1,739	0,195	—	0,015	основа
	основа	0,101	0,476	0,053	0,002	0,123	0,552	0,181	0,175	—	0,01	основа

рованном слое химических элементов Сг и Ni, входящих в состав материала проволочного ворса щетки. Подобное привнесение, по-видимому, можно объяснить тем, что при формировании хромовых покрытий, вследствие фрикционного взаимодействия ворса щетки с поверхностью основы, гораздо интенсивнее протекают процессы схватывания и налипания микрочастиц материала ворса к поверхности основы в силу его более низких прочностных свойств и высокой пластичности, по сравнению с ворсом из углеродистой стали 65Г. Таким образом, толщина хромовых покрытий, сформированных щеткой с ворсом из нержавеющей стали 03X17H14M2, может обеспечить сравнительно неплохую коррозионную стойкость покрытия, однако повышенная шероховатость поверхности покрытия может стать причиной интенсивного изнашивания герметизирующих резиновых манжет. Поэтому для снижения шероховатости поверхности в случае использования щетки с проволочным ворсом из нержавеющей стали 03X17H14M2 требуется введение дополнительной операции полировки сформированного покрытия.

Промышленная апробация технологии формирования хромовых покрытий на штоках гидроцилиндров металлорежущих станков с использованием метода ДПГИ, проведенная в ОАО «Минский завод автоматических линий им. П.М. Машерова», подтвердила целесообразность использования в качестве гибкого инстру-

мента щетку с проволочным ворсом из нержавеющей стали 03X17H14M2.

#### Список литературы

1. Свешников, В.К. Станочные гидроприводы: справ. / В.К. Свешников. — М.: Машиностроение, 2004. — 512 с.
2. Фаличева, А.И. Экологические проблемы хромирования и альтернативного покрытия / А.И. Фаличева, Ю.А. Стекольников, Н.И. Глянец // Вестн. ТГУ. — 1999. — Т. 4, вып. 2. — С. 256–257.
3. Емелюшин, А.Н. Восстановление штоков гидроцилиндров наплавкой износостойкого хромованадиевого покрытия / А.Н. Емелюшин, Е.В. Петроченко, С.П. Нефедьев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2014. — № 1. — С. 17–20.
4. Разработка технологии восстановления штоков гидроцилиндров гиперзвуковой электрометаллизацией с последующим трибомодифицированием / М.А. Белоцерковский [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2019. — Т. 15, № 12(180). — С. 565–571.
5. Verstak, A. Activated Combustion HVOF Coatings for Protection against Wear and High Temperature Corrosion / A. Verstak, V. Baranovski // Proc. of the International Thermal Spray Conference 2003, Orlando, FL, USA, ASM International, Materials Park, Ohio, USA. — 2003. — Pp. 535–541.
6. Оценка применимости технологии электродеформационного лакирования гибким инструментом для хромирования штоков гидроцилиндров / В.К. Шелег [и др.] // Трение и износ. — 2019. — Т. 40, № 3. — С. 265–271.
7. Особенности фрикционного взаимодействия хромовых покрытий с резиновым контртелом в условиях граничного трения / М.А. Леванцевич [и др.] // Вестн. ПГУ. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. — 2019. — № 3. — С. 65–71.

Levantsevich M.A., Maksimchenko N.N., Pilipchuk Ye.V., Sotnik L.L.

#### Selection of the material of the wire brush pile to form chromium coatings by deformation cladding

It has been established that when deformation cladding with a flexible tool forms chromium coatings doped with a nanoscale diamond graphite charge УДАГ (UDAG) using a brush with 65Г (65G) steel wire bristles, the surface roughness parameter  $Ra = 0.25...0.35 \mu\text{m}$  is provided, however, the thickness of the formed coating layer is only  $3...5 \mu\text{m}$ , which may not meet the requirements for ensuring corrosion resistance of coatings. When forming composite chromium coatings with 03X17H14M2 (03Kh17N14M2) stainless steel wire brushes, the layer thickness is  $10...12 \mu\text{m}$ , which can provide relatively good corrosion resistance, however, the increased surface roughness of the coating  $Ra = 0.8...1.0 \mu\text{m}$  can cause intense wear of sealing rubber cuffs. Therefore, to reduce the surface roughness in this case, the introduction of an additional polishing operation of the formed coating is required. Industrial approbation of deformation cladding with a flexible tool technology carried out at the JSC "Minsk Automatic Lines Plant named after P.M. Masherov", confirmed the feasibility of using a brush with a pile of stainless steel 03X17H14M2 (03Kh17N14M2) for chromium plating of the rods of hydraulic cylinders of metal-cutting machines.

Поступила в редакцию 30.06.2020.