

Электрохимическое нанесение твердых хромовых покрытий на внутреннюю поверхность цилиндров нефтедобывающих насосов

© Л.К. Чарушин¹, А.А. Гуров¹, Т.И. Шабатина^{1,2}

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

²МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Российская Федерация

Рассмотрен процесс проточного электрохимического хромирования внутренней поверхности цилиндров глубинного штангового насоса (ГШН). В результате анализа разработан и подобран малоконцентрированный электролит без применения добавок. Компонентами указанного электролита являются хромовый ангидрид CrO_3 и серная кислота H_2SO_4 . При нанесении покрытий используется нерастворимый анод из свинца. Раствор электролита нагревается до температуры 60...65 °С. Применяется ток средней плотности. Представлены особенности хромирования внутренних поверхностей цилиндров ГШН, а именно проведение процесса на специальной установке хромирования в зависимости от типоразмеров и длины деталей, подобрана скорость подачи раствора электролита и его температура с целью равномерного осаждения хрома по всей длине цилиндра. Отличительной особенностью установки является способ принудительной подачи нагретого раствора в пространство между поверхностями обрабатываемого изделия и коаксиально установленным по отношению к нему анодом. При этом нанесение покрытия осуществляют при возвратно-поступательном перемещении анода и вращении обрабатываемого изделия, а также при определенной скорости потока раствора электролита. В ходе эксперимента проведены исследования по подбору режимов нанесения твердохромового коррозионностойкого покрытия на внутреннюю поверхность цилиндра ГШН. В результате было найдено оптимальное соотношение хромового ангидрида и серной кислоты в водном растворе электролита, которое составляло 100:5, а также отработаны режимы оптимального нанесения покрытия. Хромовые покрытия, полученные с использованием разработанного малоконцентрированного электролита и способа хромирования, обладают повышенной до 25 % твердостью и уменьшенной пористостью после хонингования в 50 раз и более; при этом образуются блестящие твердые низкопористые осадки-слои, которые отвечают требованиям коррозионностойкости и износостойкости покрытий.

Ключевые слова: электрохимическое хромирование, установка электрохимического хромирования, внутренняя цилиндрическая поверхность, хромовое покрытие, концентрированный электролит, глубинный штанговый насос

Введение. Погружные глубинные штанговые насосы (ПГШН) используются во всем мире при механической добыче нефти. Конструктивно они имеют устоявшийся состав узлов, к которым предъявляются определенные требования по геометрическим параметрам и предметному исполнению [1, 2].

Для повышения прочности, износо- и коррозионной стойкости деталей широко применяются различные виды покрытий. Особое место среди них занимают гальванические покрытия на основе хрома.

Хромовые покрытия используются как в промышленных, так и в декоративных целях. В большинстве коррозионных сред они ведут себя как катодные покрытия. Их применение во многих областях обусловлено следующими преимуществами.

Во-первых, нанесение таких покрытий осуществляется при температурах, не вызывающих изменений структуры и механических свойств материала покрываемой детали [3, 4]. Во-вторых, имеет место высокая геометрическая точность осажденных хромовых покрытий, позволяющая сократить число операций механической и других видов обработки детали после нанесения такого гальванического покрытия. В-третьих, детали с хромовым покрытием обладают повышенной износоустойчивостью, высокой коррозионной стойкостью, а также устойчивостью к перепадам температур. Все это увеличивает срок их службы и срок службы изделия в целом [5, 6].

Предъявляющиеся в настоящее время высокие требования к эксплуатационным характеристикам хромового покрытия обеспечиваются получением высококачественного равномерного по толщине на всей поверхности детали, слоя хрома. Высоким качеством обладают слои с уменьшенной пористостью и увеличенной микротвердостью, которые одновременно являются и коррозионностойкими. Качество и толщина покрытий зависят от состава хромосодержащего электролита и условий их нанесения. Так, в зависимости от катодной плотности тока, состава и температуры электролита можно получать серые, молочные или блестящие хромовые покрытия [7–9].

Цель данного исследования — разработка способа получения качественного твердого коррозионностойкого хромового покрытия на внутренней поверхности цилиндров ПГШН, увеличивающего срок их службы, путем подбора определенного состава хромосодержащего электролита и условий электролитического осаждения хромового покрытия.

Аналитическая часть. Известен способ, в котором электролитом для нанесения хромовых покрытий служит раствор, содержащий 1,0...1,5 (CrO_3) и 0,010...0,015 (H_2SO_4) моль/л. Нанесение покрытия в этом способе осуществляют погружением детали в гальваническую ванну с указанным электролитом, нагретым до температуры 55...60 °С и последующим пропусканием тока. Плотность последнего при этом колеблется в диапазоне 50...120 А/дм² [10]. К недостаткам данного способа относятся соотношение компонентов ($\text{CrO}_3:\text{H}_2\text{SO}_4$), равное 100:1, и режимы электролиза, не позволяющие получить низкопористое хромовое покрытие, вследствие чего оно является некоррозионностойким.

Наиболее близким по технической сущности является другой способ, в котором используется проточный электролит состава 2,0...3,0 (CrO_3) и 0,035...0,071 (H_2SO_4) моль/л. Хромирование в данном

способе осуществляют в специальной установке. Электролит в нее подается принудительно в пространство между поверхностями обрабатываемого цилиндра и анода, размещаемого внутри цилиндра соосно с его внутренней поверхностью, подвергающейся хромированию. Вследствие принудительной проточной подачи раствора происходит, во-первых, его непрерывное обновление и, во-вторых, равномерное газонасыщение межэлектродного пространства. Нанесение покрытия из раствора осуществляют со скоростью потока 100...120 см/с при температуре 50...55 °С и плотности тока 45...55 А/дм². Расстояние между поверхностью анода и покрываемой поверхностью колеблется в интервале от 3 до 15 мм [11, 12].

К недостаткам данного способа относятся плохая рассеивающая способность и сравнительно низкий выход хрома по току. Вследствие этого получают покрытия низкого качества: с малой микротвердостью и большой пористостью, а также с высоким наводороживанием. Следует отметить, что при большой пористости возникает опасность возникновения и развития коррозии, а также сохраняются высокие внутренние напряжения в покрытии, снижающие механические характеристики металла цилиндра.

Как и в первом способе, значительные концентрации хромового ангидрида негативно воздействуют на здоровье человека и окружающую среду в виду больших испарений и уносов в вентиляцию. К тому же требуются существенные материальные затраты на очистку воздуха в помещениях цеха и нейтрализацию гальванических стоков и шламов.

На неравномерности толщины осаждения хрома по диаметру влияют ошибки в центрировании анода относительно цилиндра. Там, где расстояние меньше, скорость роста толщины покрытия будет больше, и наоборот. Отмеченное приводит к образованию погрешностей в форме покрываемой детали — появлению *овальности*. Для их исключения используют специальные приспособления, обеспечивающие правильное и точное взаимное расположение анода и цилиндра. Имеет место и неравномерное осаждение слоя хрома по длине детали, зависящее от способа подвода тока к аноду и от длины самого цилиндра. При подведении тока к торцу одного конца анода из-за сопротивления металла анода уменьшается сила тока по его длине. И чем длиннее и тоньше анод, тем существеннее разница в силе тока. Еще одна причина неодинаковой толщины покрытия по длине детали — интенсивное выделение водорода на катоде в верхней части установки хромирования, приводящее к непостоянству значения электропроводности раствора электролита. К тому же это служит и причиной образования поверхностных микротрещин в покрытии. Для устранения отмеченных выше недостатков в работе [13] предложена

установка электролитического хромирования внутренней поверхности, в которой осуществляется принудительная проточная подача нагретого раствора в пространство между поверхностями обрабатываемого цилиндра и анода, установленного коаксиально цилиндру. Нанесение покрытия осуществляется в проточном электролите и сопровождается возвратно-поступательным движением анода с одновременным вращением с определенной скоростью обрабатываемого цилиндра. Это позволяет получать равномерные по толщине хромовые покрытия, в которых отсутствуют внутренние напряжения. При этом одновременно происходит унос образовавшихся газов из рабочей зоны нанесения покрытия.

Для выравнивания поверхности внутреннего цилиндрического хромового слоя применяют *хонингование* — вид абразивной обработки чаще всего конических и цилиндрических поверхностей. Этот метод обработки относится к высокоточному шлифованию, позволяющему устранять шероховатости поверхности, корректировать геометрическую форму детали, а также повышать точность ее габаритных размеров [14].

Экспериментальная часть. Для определения оптимальных состава электролита и условий электролитического осаждения использовали установку проточного хромирования [13]. Помещенный в нее нерастворимый анод изготовлен из свинца или из его сплава с сурьмой. Он установлен коаксиально относительно цилиндра, выполняющего роль катода. Нанесение покрытия на внутреннюю цилиндрическую поверхность проводилось путем непрерывного прокачивания хромосодержащего электролита, нагретого до температуры 52...65 °С, через внутреннюю полость. При этом осуществлялось возвратно-поступательное перемещение анода с одновременным вращением цилиндра ПГШН. Хромирование прекращали, когда толщина слоя хрома на внутренней цилиндрической поверхности достигала 120 мкм. Затем хромированная поверхность подвергалась чистовой обработке хонингованием до чистоты не менее 100 мкм.

Для примера приведены исследования пяти опытов, для которых использовали различные составы хромосодержащего электролита и которые проходили в различных условиях электролиза (табл. 1).

Характеристики получаемых хромовых покрытий представлены в табл. 2. Для сравнения в ней даны и характеристики покрытия, получаемого с использованием концентрированного (с содержанием равным 1,5 моль/л CrO_3 и более) и разбавленного (с содержанием равным 1,3 моль/л CrO_3 и менее) хромосодержащего электролита.

Микротвердость покрытий измеряли согласно ГОСТ 9.308–85 при их толщине, равной 150 мкм после хромирования и 100 мкм после хонингования. Пористость покрытий определяли по ГОСТ 9.302–88 при указанной выше толщине.

Таблица 1

Состав электролита и режимы электролитического осаждения хрома

Номер опыта	Концентрация компонентов электролита, моль/л		Условия электролитического осаждения		
	CrO ₃	H ₂ SO ₄	Температура, °C	Плотность тока, А/дм ²	Скорость протока, см/с
1	0,50	0,05	63	60	150
2	0,80	0,05	60	60	150
3	1,00	0,04	63	70	200
4	1,30	0,04	65	60	120
5	2,20	0,04	52	55	150

Таблица 2

Характеристики получаемых хромовых покрытий

Номер опыта	Микро-твердость, HV	Пористость, пор/см ²		Внешний вид хромового покрытия
		до хонингования	после хонингования	
1	900	1,50	3,00	Матовое
2	950	0,05	0,10	Блестящее
3	1150	0,05	0,10	Блестящее
4	1000	0,05	0,10	Блестящее
5	930	1,20	2,50	Матовое

Хромированный цилиндр (рис. 1) был разрезан на отрезном станке для визуализации полученного твердохромового блестящего покрытия. На микроскопе «Неофот-2» была изучена микроструктура полученного покрытия (рис. 2).



Рис. 1. Образец разрезанного цилиндра ПГШН с хромовым покрытием

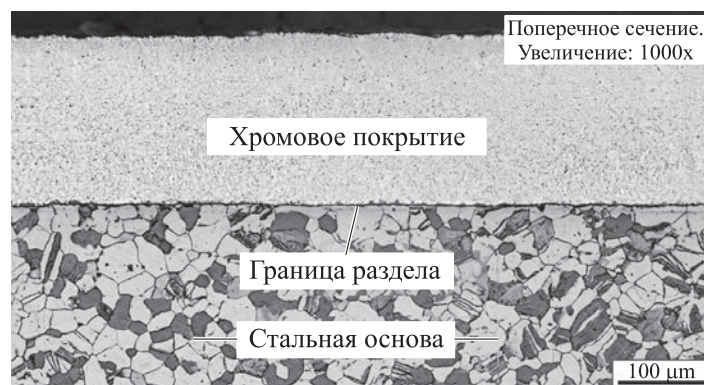


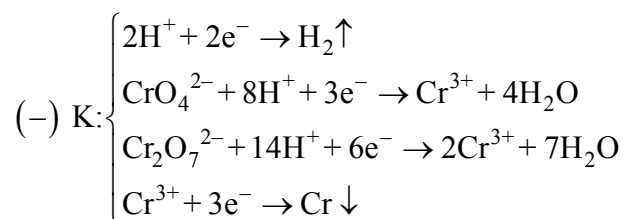
Рис. 2. Металлографический шлиф хромированного цилиндра ПГШН

На основании проведенного металлографического анализа поперечного сечения шлифа твердого хромового покрытия на стальной основе можно сделать следующие выводы:

- наблюдается структура с развитой сетью микротрещин, что является нормой для электролитически осажденного хрома; указанная структура обеспечивает оптимальный баланс твердости и релаксации внутренних напряжений;
- сквозная пористость отсутствует; защитные свойства обеспечиваются значительной толщиной и перекрывающимся характером микротрещин;
- зона адгезии непрерывна и свободна от дефектов, что свидетельствует о правильном проведении циклов обезжиривания и анодного травления перед хромированием.

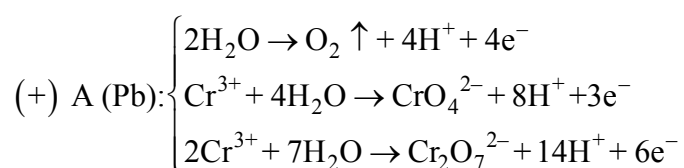
Данное покрытие полностью пригодно для работы в условиях интенсивного абразивного износа и агрессивных коррозионных сред.

Обсуждение результатов. При растворении CrO_3 в воде образуется раствор, содержащий смесь дихромовой $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ и хромовой H_2CrO_4 кислот. Электролитическое осаждение Cr из такого раствора отличает данный способ нанесения от других, использующих в качестве хромосодержащих компонентов различные соли хрома. Для обеспечения осаждения свободного хрома и увеличения плотности и износостойкости получаемого покрытия указанный электролит наряду с CrO_3 содержит и определенную концентрацию H_2SO_4 . Соотношение между компонентами ($\text{CrO}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4$) составляет 100 : 5. Оптимальные режимы хромирования: температура раствора 63 °С; плотность тока 70 А/дм²; скорость протока электролита 200 см/с. Такое соотношение параметров обеспечивает выделение свободного хрома из раствора на катоде — на внутренней поверхности цилиндра ПГШН, что сопровождается одновременным выделением водорода H_2 и образованием на нем еще трехзарядных катионов Cr^{3+} .



Указанные побочные процессы снижают выход хрома по току.

Анодный процесс сопровождается выделением кислорода и окислением образовавшихся ионов трехвалентного хрома Cr^{3+} до шестивалентного Cr^{+6} (CrO_4^{2-} и $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$):



Свинец, как и его сплав с сурьмой, имеет большое значение перенапряжения выделения кислорода, что позволяет снизить скорость указанного конкурирующего электродного процесса. При хромировании свинцовый анод покрывается слоем оксида состава PbO_2 , который, во-первых, препятствует разрушению анода и, во-вторых, ускоряет процессы восстановления $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ и CrO_4^{2-} ионов до катионов Cr^{3+} .

Экспериментально были подобраны оптимальные состав и концентрации компонентов — H_2SO_4 и CrO_3 в растворе (см. табл. 1). При концентрациях H_2SO_4 , равных или менее 0,04 моль/л, получается рыхлый слой хрома с низкой адгезией, легко отслаивающийся от цилиндрической поверхности. Если же концентрация H_2SO_4 была равна или превышала 0,05 моль/л, то существенно снижался выход хрома по току вследствие интенсивного выделения в этом случае водорода. Последнее приводило к наводораживанию покрытия и, следовательно, к изменению его физико-механических свойств. Концентрация хромового ангидрида в растворе менее 0,80 моль/л вызывала снижение стабильности электролита хромирования и ухудшение качества покрытия. В то же время при его концентрации в растворе более 1,30 моль/л уменьшалась рассеивающая способность, а значит, не достигались требуемые значения физико-механических свойств покрытия.

К аспектам, снижающим производительность и усложняющими процесс хромирования, также относятся отрицательный потенциал восстановления CrO_4^{2-} ионов; необходимость использования нерастворимых анодов и применения токов высокой плотности; низкая рассеивающая способность электролита.

Заключение. Экспериментально выбрано соединение хрома в виде CrO_3 , которое является основным компонентом электролита

хромирования. Подобран оптимальный состав последнего, позволяющий получать высококачественные хромовые покрытия с хорошими функциональными свойствами.

Усовершенствован способ хромирования: процесс осуществляется в специальной установке при возвратно-поступательном перемещении конического анода с одновременным вращением обрабатываемого цилиндра.

Получаемые с использованием предлагаемых состава электролита и способа хромирования покрытия:

- обладают повышенными кроющей и рассеивающей способностями;
- низкой степенью наводораживания поверхности;
- высокой твердостью и уменьшенной в 50 раз и более пористостью;
- удовлетворяют требованиям коррозионной стойкости и одновременно износостойкости.

Для ПГШН, работающего в условиях добычи нефти, переход на разбавленный электролит — это не улучшение, а технологическая необходимость. В скважине цилиндр подвергается воздействию механических примесей (песка), агрессивных сред (H_2S , CO_2) и высокого давления.

В данном исследовании количественная оценка выглядит следующим образом.

1. Сопротивление абразивному износу (песку и механическим примесям); нефть часто содержит частицы кварцевого песка, твердость которых сопоставима с хромом из концентрированного электролита:

- хром из концентрированного электролита (~700 HV) — песок царапает поверхность, создавая глубокие риски, и скорость износа экспоненциально увеличивается после появления первой царапины;
- хром из разбавленного электролита (>950 HV) — твердость покрытия превышает твердость большинства абразивных частиц, что снижает интенсивность гидроабразивного износа в 3–4 раза.

2. Защита от «водородного охрупчивания» и коррозии, так как при добыче «кислой» нефти (с содержанием сероводорода) обычный хром быстро деградирует из-за микропор, и сероводород проникает сквозь поры к стальному основанию цилиндра, вызывая коррозию под слоем хрома, что приводит к скалыванию (отслоению) покрытия пластинами.

Данный метод хромирования из разбавленного электролита с «закрытой» структурой пор увеличивает коррозионную стойкость в 2,5 раза, что показали результаты натурных испытаний в скважине.

3. Коэффициент трения и энергоэффективность, поскольку пара «плунжер — цилиндр» совершает тысячи циклов в сутки, а так как хром из разбавленного электролита имеет более низкий коэффициент

трения, чем обычный (0,12 против 0,20 в нефтяной среде), это снижает не только износ самой пары на 40...50 %, но и нагрузку на станок-качалку и колонну штанг, что косвенно продлевает жизненный цикл всей системе (табл. 3).

Таблица 3

Ресурс ПГШН в скважине

Характеристика скважины	Ресурс рабочего времени при использовании электролита, мес.		Прирост, %
	концентрированного	разбавленного	
Малодебитная, «истощенная»	18–24	36–48	+ 100
С высоким содержанием песка	3–6	12–18	+ 200–300
Агрессивная	4–8	15–20	+ 150–250

Для ПГШН применение хромирования из разбавленного электролита (толщиной хонингованного слоя 100 мкм) позволяет достичь показателя межремонтного периода в среднем в 2,8 раза выше, чем при использовании стандартных методов хромирования. Если учитывать стоимость «подъема» насоса и остановки скважины, то полученный экономический эффект уменьшает затраты на хромирование данным способом в первый же год эксплуатации в целом.

Предложенное решение позволяет успешно решить задачу увеличения срока службы цилиндров ПГШН. Кроме того, использование менее концентрированных по CrO_3 растворов, во-первых, снижает их агрессивность по отношению к деталям (ванне, аноду, различной фурнитуре) из стали, свинца, меди и других материалов, а, во-вторых, снижает потери хромового ангидрида из-за уноса в вентиляцию и с промывными водами. Все это позволяет соблюсти требования экологии — снизить экологическую опасность, улучшить условия труда в гальваническом цеху и таким образом сократить долю непроизводительных материальных затрат.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sherif Fakher, Abdelaziz Khlaifat, M. Enamul Hossain, Hashim Nameer. A comprehensive review of sucker rod pumps' components, diagnostics, mathematical models, and common failures and mitigations. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2021, no. 11, pp. 3815–3839. <https://doi.org/10.1007/S13202-021-01270-7>
- [2] Liao Z., la Monaca A., Murray J., Speidel A., Ushmaev D., Clare A., Axinte D., M'Saoubi R. Surface integrity in metal machining. Part I: Fundamentals of surface characteristics and formation mechanisms. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, vol. 162. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103687>
- [3] Muhammad Yelwa J., Musa H., Fasanya O.O., Yusuf Yahaya J. Corrosion-resistant coatings: advances in deposition methods, nanostructures, and self-healing films. *Academia Materials Science*, 2025, no. 2. <https://doi.org/10.20935/AcadMatSci7829>

- [4] Fabiocchi L., Lecis N., Mounir K. Innovative coating for Electroplated Hard Chromium replacement in severe environments. *La Metallurgia Italiana*, 2024, no. 6, pp. 24–32.
- [5] Rahimi E., Nijdam T., Jahagirdar A., Broitman E., Mol A. Advanced Nodular Thin Dense Chromium Coating: Superior Corrosion Resistance. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, vol. 17, iss. 5, pp. 8588–8600. DOI: 10.1021/acsami.4c19897
- [6] Okonkwo B.O., Jeong C., Jang C. Advances on Cr and Ni Electrodeposition for Industrial Applications — A Review. *Coatings*, 2022, vol. 12, art. 1555. DOI: 10.3390/coatings12101555
- [7] Saputra Febbi, Arifvianto Budi. Effect of Chromium plating duration on the microstructure, hardness, wear resistance, and corrosion rate of s45c steel for hydraulic cylinder rod. *Journal of Physics: Conference Series*, 2026, vol. 3186, art. 012068. DOI: 10.1088/1742-6596/3186/1/012068
- [8] Avalos J.C., Martínez A.S., Aldeco-Pérez E., Torres-González J., Orozco G. Trivalent Chromium electroplating baths—the inner-sphere complex hypothesis. *Reactions*, 2025, vol. 6, art. 71. <https://doi.org/10.3390/reactions6040071>
- [9] Богатова П.С., Дикий П.А. Современные исследования в области гальванического хромирования. *Аграрное образование и наука*, 2023, № 2, с. 3
- [10] *ASTM B177/B177M-11(2021) Standard Guide for Engineering Chromium Electroplating*. ASTM International, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- [11] Ардашев Д.В. Метод нанесения твердохромового покрытия на внутренние цилиндрические поверхности. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*, 2021, т. 21, № 3, с. 45–52.
- [12] Беляев В.Н., Козлюк А.Ю., Соловьева К.Н. Получение многослойных хромовых покрытий внутренних поверхностей длинномерных цилиндрических изделий. *Материалы XI Международной научно-практической конференции Инновации в машиностроении (ИНМАШ-2020)*. Бийск, Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та им. И. И. Ползунова, 2020, с. 257–261.
- [13] Васильев А.А. Установка для электролитического хромирования внутренней поверхности трубных заготовок. Патент RU143186U1. Опубл.: 20 июля 2014 г.
- [14] Новиков Н.В., Клименко С.А. Хонингование. В кн.: *Инструменты из сверхтвёрдых материалов*. Москва, Машиностроение, 2014, с. 428 (Библиотека инструментальщика). ISBN 978-5-94275-703-8

Статья поступила в редакцию 30.03.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Чарушин Л.К., Гуров А.А., Шабатина Т.И. Электрохимическое нанесение твердых хромовых покрытий на внутреннюю поверхность цилиндров нефтедобывающих насосов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 7. EDN IHACJU

Чарушин Лев Константинович — ассистент кафедры «Химия», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: k22b@yandex.ru

Гуров Александр Алексеевич — канд. хим. наук, доцент кафедры «Химия», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: aagurov@bmstu.ru

Шабатина Татьяна Игоревна — д-р хим. наук, профессор кафедры «Химия», МГТУ им. Н.Э. Баумана; ведущий научный сотрудник, доцент химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. e-mail: tatyanaashabatina@yandex.ru

Electrochemical Application of Hard Chrome Coatings on the Inner Surface of Cylinders of Oil-Producing Pumps

© L.K. Charushin¹, A.A. Gurov¹, T.I. Shabatina^{1,2}

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation

The process of flow-through electrochemical chrome plating of the inner surface of the cylinders of a deep rod pump (DRP) is considered. As a result of the analysis, a low-concentration electrolyte was developed and selected without the use of additives. The components of this electrolyte are chromium anhydride CrO_3 and sulfuric acid H_2SO_4 . When applying coatings, an insoluble lead anode is used. The electrolyte solution is heated to a temperature of 60...65 °C. A medium-density current is used. The features of chrome plating of the inner surfaces of DRP cylinders are presented, namely, carrying out the process on a special chrome plating plant, depending on the size and length of the parts, the rate of supply of the electrolyte solution and its temperature are selected in order to evenly deposit chromium along the entire length of the cylinder. A distinctive feature of the installation is the method of forced feeding of a heated solution into the space between the surfaces of the processed product with an anode coaxially mounted in relation to it. In this case, the coating is applied when the anode is reciprocated and the product is rotated at the rate of flow of the electrolyte solution. During the experiment, studies were conducted on the selection of modes for applying a hard chromium corrosion-resistant coating to the inner surface of the DRP cylinder. As a result, the optimal ratio of chromium anhydride and sulfuric acid in an aqueous electrolyte solution was found, which was 100:5, and optimal coating modes were worked out. Chrome coatings obtained using the developed low-concentration electrolyte and the chrome plating method have increased hardness up to 25% and reduced porosity by 50 times or more after honing; at the same time, shiny solid low-porous sediments are formed-layers that meet the requirements of corrosion resistance and wear resistance of coatings.

Keywords: electrochemical chrome plating, electrochemical chrome plating plant, chrome plating, inner cylindrical surface, chrome coating, concentrated electrolyte, deep rod pump

REFERENCES

- [1] Sherif Fakher, Abdelaziz Khlaifat, M. Enamul Hossain, Hashim Nameer. A comprehensive review of sucker rod pumps' components, diagnostics, mathematical models, and common failures and mitigations. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2021, no. 11, pp. 3815–3839. <https://doi.org/10.1007/S13202-021-01270-7>
- [2] Liao Z., la Monaca A., Murray J., Speidel A., Ushmaev D., Clare A., Axinte D., M'Saoubi R. Surface integrity in metal machining. Part I: Fundamentals of surface characteristics and formation mechanisms. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, vol. 162. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103687>
- [3] Muhammad Yelwa J., Musa H., Fasanya O.O., Yusuf Yahaya J. Corrosion-resistant coatings: advances in deposition methods, nanostructures, and self-healing films. *Academia Materials Science*, 2025, no. 2. <https://doi.org/10.20935/AcadMatSci7829>
- [4] Fabiocchi L., Lecis N., Mounir K. Innovative coating for Electroplated Hard Chromium replacement in severe environments. *La Metallurgia Italiana*, 2024, no. 6, pp. 24–32.

- [5] Rahimi E., Nijdam T., Jahagirdar A., Broitman E., Mol A. Advanced Nodular Thin Dense Chromium Coating: Superior Corrosion Resistance. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, vol. 17, iss. 5, pp. 8588–8600. DOI: 10.1021/acsami.4c19897
- [6] Okonkwo B.O., Jeong C., Jang C. Advances on Cr and Ni Electrodeposition for Industrial Applications — A Review. *Coatings*, 2022, vol. 12, art. 1555. DOI: 10.3390/coatings12101555
- [7] Saputra Febbi, Arifvianto Budi. Effect of Chromium plating duration on the microstructure, hardness, wear resistance, and corrosion rate of S45C steel for hydraulic cylinder rod. *Journal of Physics: Conference Series*, 2026, vol. 3186, art. 012068. DOI: 10.1088/1742-6596/3186/1/012068
- [8] Avalos J.C., Martínez A.S., Aldeco-Pérez E., Torres-González J., Orozco G. Trivalent Chromium electroplating baths—the inner-sphere complex hypothesis. *Reactions*, 2025, vol. 6, art. 71. <https://doi.org/10.3390/reactions6040071>
- [9] Bogatova P.S., Dikiy P.A. Sovremennye issledovaniya v oblasti gal'vanicheskogo khromirovaniya [Modern research in the field of electroplated chromium coatings]. *Agrarnoe obrazovanie i nauka — Agrarian Education and Science*, 2023, no. 2, p. 3.
- [10] *ASTM B177/B177M-11(2021) Standard Guide for Engineering Chromium Electroplating*. ASTM International, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- [11] Ardashev D.V. Metod naneseniya tverdokhromovogo pokrytiya na vnutrennie tsilindricheskie poverkhnosti [Method of applying hard chromium coating to internal cylindrical surfaces]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Mashinostroenie — South Ural State University Bulletin. Series Mechanical Engineering*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 45–52.
- [12] Belyaev V.N., Kozlyuk A.Yu., Solov'eva K.N. Poluchenie mnogosloynnykh khromovykh pokrytiy vnutrennikh poverkhnostey dlinnomernykh tsilindricheskikh izdeliy [Production of multilayer chromium coatings on the internal surfaces of long cylindrical products]. In: *Materialy XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Innovatsii v mashinostroenii» (INMASH-2020)* [Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference “Innovations in Mechanical Engineering” (INMASH-2020)]. Biysk, Polzunov Altai State Technical University Publ., 2020, pp. 257–261.
- [13] Vasilyev A.A. *Ustanovka dlya elektroliticheskogo khromirovaniya vnutrenney poverkhnosti trubnykh zagotovok* [Device for electrolytic chromium plating of the inner surface of tubular blanks]. Patent RU143186U1. Published July 20, 2014.
- [14] Novikov N.V., Klimenko S.A. Khoningovanie [Honing]. In: *Instrumenty iz sverkhtverdykh materialov* [Tools made of superhard materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2014, p. 428. (Biblioteka instrumentalschika). ISBN 978-5-94275-703-8.

Charushin L.K., assistant of the Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: k22b@yandex.ru

Gurov A.A., Cand. Sc. (Chemistry), Associate Professor of the Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: aagurov@bmstu.ru

Shabatina T.I., Dr. Sc. (Chemistry), Professor of the Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University; Leading Researcher, Associate Professor of the Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University. e-mail: tatyana-shabatina@yandex.ru