

МЕТОД НАНЕСЕНИЯ ТВЕРДОХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ НА ВНУТРЕННИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

Д.В. Ардашев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Рассмотрены процессы хромирования применительно к внутренним поверхностям цилиндров гидроприводов с гидростатическими направляющими. Проанализированы основные факторы, снижающие производительность электрохимического осаждения хрома вне зависимости от вида поверхности, а именно: применение в качестве электролита смеси хромовой кислоты с активными анионами с низкой, рассеивающей способностью, использование нерастворимых анодов и токов высокой плотности. Представлены особенности хромирования внутренних поверхностей гидроцилиндра, а именно ограниченность применения установок в зависимости от типоразмеров деталей и неравномерность скорости осаждения хрома по длине детали. Для нанесения покрытия на внутренние поверхности разработана установка, включающая катод, анод, бак и трубопровод. Отличительными особенностями установки является способ подачи электролита под наклоном к горизонтали, что позволяет подавать электролит в виде турбулентного потока, закручивающегося по винтовой траектории, и корпус установки, который является хромируемой деталью. В процессе работы проводились экспериментальные исследования по подбору режимов нанесения твердохромового покрытия на внутренние поверхности гидроцилиндра. В результате работы определено оптимальное соотношение хромового ангидрида и серной кислоты в составе электролита, которое равно 10:1 соответственно, и режимы его нанесения. Хромовые покрытия, полученные с использованием разработанного концентрированного электролита и способа хромирования, обладают повышенной на 5...20 % твердостью и уменьшенной пористостью в 10...30 раз при образовании блестящих твердых осадков, что соответствует коррозионностойкому и износостойкому покрытию.

Ключевые слова: хромирование, внутренние поверхности, цилиндрические поверхности, хромовые покрытия.

Введение

В современном машиностроении для повышения прочности, износостойкости и коррозионной стойкости при изготовлении деталей широко применяются различные виды покрытий, особенно популярны гальванические покрытия, обладающие рядом преимуществ:

- нанесение покрытия при температурах, не вызывающих изменений структуры и механических свойств покрываемой поверхности;
- высокая геометрическая точность получаемых покрытий, позволяющая сократить количество операций механической обработки после покрытия;
- контроль физико-механических свойств по толщине в процессе нанесения покрытия.

Лидером по применяемости среди гальванических покрытий является хромирование. Хромовые покрытия используются в различных отраслях как в промышленных целях, так и в декоративных. Нанесение хромового покрытия на изделие повышает его изнаноустойчивость, коррозионную стойкость, устойчивость к перепадам температур [1–11].

Применительно к гидроприводам с гидростатическими направляющими, применяемым в стендовом испытательном оборудовании, необходимо гарантировать их повышенную износостойкость, что обеспечит ресурс работы до 10^8 циклов возвратно-поступательных движений под нагрузкой. Исходя из этого, следует хромировать наружную поверхность шток-поршня и внутреннюю поверхность цилиндра. Ранее уже была разработана технология нанесения твердохромового покрытия наружных поверхностей [12–14]. Для нанесения твердохромового покрытия на внутренние поверхности гидроцилиндра необходимо разработать состав хромового электролита

и режимы его нанесения, обеспечивающие максимальное качество и производительность нанесения покрытия.

1. Лимитирующие параметры процесса хромирования

Электрохимическое осаждение хрома производится из электролитов, которые вместо солей осаждаемого металла содержат смеси дихромовой и хромовой кислот ($\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ и H_2CrO_4), что значительно отличает процесс от других видов гальванических покрытий. Для обеспечения выделения свободного хрома из раствора кислоты в электролит должна быть определенная концентрация активных анионов, чаще всего SO_4^{2-} , F^- , SiF_6^{2-} (рис. 1). Другими параметрами, снижающими производительность и повышающими сложность процесса хромирования, являются высокий отрицательный потенциал восстановления хромат-ионов, низкий выход металла по току, необходимость применения токов высокой плотности и нерастворимых анодов, очень низкая рассеивающая способность электролита.

Процесс осаждения хрома из электролита состоит из отдельных катодных процессов, а именно: выделения металлического хрома, выделения водорода и образование трехвалентного хрома. Рассмотрим зависимость выхода металла по току в зависимости от концентрации сульфат-ионов для каждого из них (рис. 2). Исследования проводились с электролитом, содержащим 350 г/л хромового ангидрида при плотности тока 15 А/дм² и температуре 20 °С. Из анализа графиков, представленных на рис. 2, следует, что для увеличения выхода металла по току необходимо использовать в электролите определенное соотношение между концентрацией хромовой кислоты (H_2CrO_4) и постороннего аниона (SO_4^{2-}), близком к 100:1.

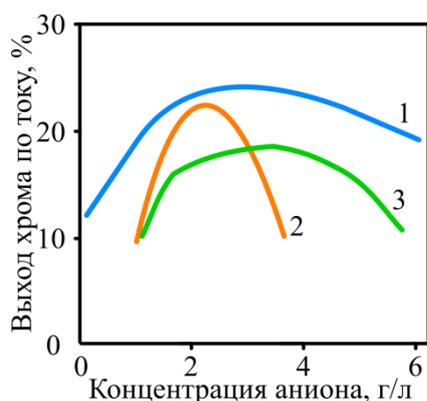


Рис. 1. Влияние концентрации активного аниона на выход по току: 1 – SiF_6^{2-} , 2 – F^- , 3 – SO_4^{2-}

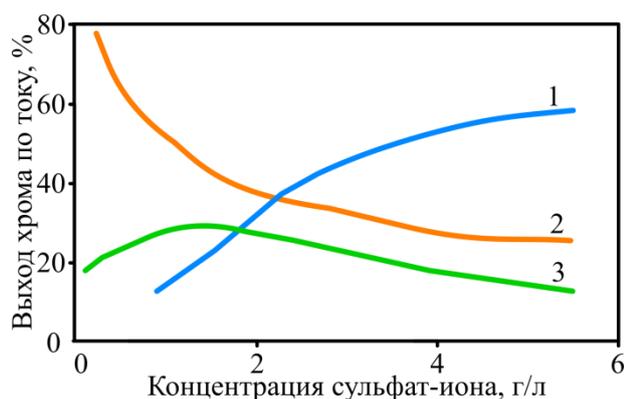


Рис. 2. Зависимость выхода по току от концентрации SO_4^{2-} для частных катодных процессов: 1 – образование трехвалентного хрома, 2 – выделение водорода, 3 – выделение металлического хрома

Применение при хромировании нерастворимых анодов обусловлено разностью между скоростью растворения и осаждения хрома. Применение нерастворимых анодов требует постоянного контроля состава электролита и периодического пополнения расхода хромовой кислоты.

При хромировании применяются аноды из свинца или его сплавов с сурьмой. Анодный процесс состоит в выделении кислорода и окислении трехвалентного хрома до шестивалентного. Свинец (так же, как и сурьма) характеризуется высокими значениями величин перенапряжения выделения кислорода, что позволяет снизить скорость одного из конкурирующих электродных процессов – выделения кислорода.

В процессе хромирования аноды покрываются слоем оксида свинца (IV) PbO_2 , который защищает их от разрушения, а также ускоряет процесс перехода $\text{Cr}^{6+} \rightarrow \text{Cr}^{3+}$. При изменении соотношений между анодной и катодной плотностями тока можно установить такое равновесие, при котором количество трехвалентного хрома, окисляемого на аноде, будет равно количеству, которое попадает в электролит из катодной зоны. Такое равновесие возможно обеспечить, поддерживая соотношение площадей катодной и анодной поверхностей в пределах от 1:2 до 2:3.

Технология и устройства нанесения твердохромовых покрытий на наружные поверхности деталей не могут быть использованы для нанесения покрытия на внутренние поверхности втулок и труб по ряду причин.

Во-первых, расстояние между анодами и деталью лимитировано двумя параметрами: производительностью процесса и свободным перемещением электролита. Чем больше пространство между анодом и деталью, тем медленнее скорость нанесения покрытия, а следовательно, и производительность. Поэтому зазор между анодом и деталью рекомендуется делать в диапазоне от 20 до 35 мм, но не более 50 мм. Это в свою очередь приводит к неуниверсальности технологии для всех типоразмеров заготовок и требует изготовления анода для каждого диапазона диаметров.

Во-вторых, погрешности центрирования анода относительно детали скажутся на равномерности осаждения хрома по диаметру, где расстояние будет меньше, там будет больше скорость роста покрытия, и наоборот, что приведет к образованию погрешности формы изготавливаемой детали – овальности. Для предотвращения данной погрешности используют специальные приспособления [15–17], которые обеспечивают правильность и точность взаимного расположения анода и детали.

В-третьих, неравномерность осаждения хрома по длине зависит от длины детали и способа подвода тока к аноду. Если ток подводится к аноду с одного торца, то сопротивления металла анода будет приводить к уменьшению силы тока по его длине, и чем длиннее и тоньше анод, тем существеннее будет разница. Анализ литературы показал, что для решения представленных проблем имеются решения. Так, в своем изобретении М.А. Шлугер и В.А Казаков [18] предлагают способ размерного хромирования, при котором применяют конусный анод. Изменение формы анода позволило компенсировать разницу силы тока на верхнем и нижнем его торцах. Авторами установлена эмпирическая зависимость для определения верхнего и нижнего диаметра:

$$d_1 - d_2 = k \cdot l, \quad (1)$$

где d_1 – диаметр верхней части анода; d_2 – диаметр нижней части анода; k – коэффициент, равный 1/50...1/55 – для сквозных отверстий и 1/30...1/35 – для глухих; l – высота анода, равная высоте отверстия, если он сквозной и уменьшенная на 10...15 мм, если глухой.

В-четвертых, другой причиной неравномерности толщины покрытия по длине является выделение водорода в верхней части установки хромирования, что приводит к непостоянству электропроводимости электролита. Кроме того, это также является причиной образования микротрещин на поверхности покрытия. Для устранения этих дефектов авторами изобретения [19] предложен способ электролитического хромирования внутренней поверхности, в котором деталь вращается, а анод располагается с эксцентриситетом к оси вращения детали. Это позволяет намеренно изменять плотность тока в поперечном сечении детали и тем самым снижать возникающие внутренние напряжения. Однако применение данного метода приводит к непостоянству свойств покрытия в поперечном сечении.

Таким образом, хромирование внутренних поверхностей сопряжено с рядом проблем, но в целом имеются известные решения для устранения этих проблем или уменьшения их влияния на конечный результат хромирования.

2. Подбор состава электролита для хромирования внутренних поверхностей

Для проведения ряда экспериментов с целью установления оптимального состава электролита для покрытия внутренних поверхностей использовалась установка для нанесения твердохромового покрытия на внутреннюю поверхность втулок диаметром от 140 до 170 мм. Принципиальная схема установки изображена на рис. 3. Установка состоит из двух основных частей – верхней и нижней. Нижняя часть включает: бак для электролита 5, электролитическую ванну 3, в которую установлены штуцеры для подачи электролита 7, расположенные под углом 10° к горизонтали. В центре ванны 3 установлен полой анод 8, к которому на выходе из ванны прикреплен шланг для отвода электролита 4. Верхняя часть представляет собой крышку из органического стекла 1 и устройство закрепления 10. В крышке 1 имеется глухое отверстие для центрирования анода 8. Хромируемая втулка 2 для экономии материалов и облегчения установки является частью корпуса установки хромирования. Катод 9 является разборным и закрепляется на детали с помощью болтов.

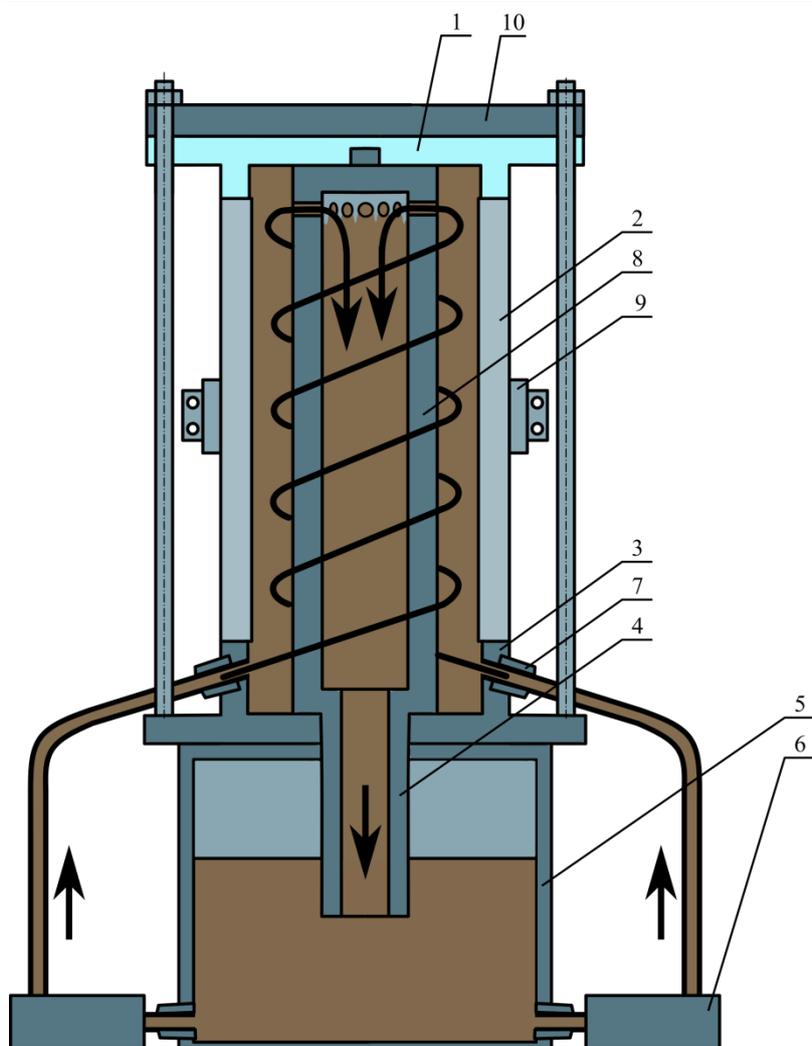


Рис. 3. Принципиальная схема установки для отработки состава электролита, состоящая из: 1 – крышка из органического стекла, 2 – хромируемая втулка, 3 – электролитическая ванна, 4 – шланг для отвода электролита, 5 – бак для электролита, 6 – насос, 7 – штуцер, 8 – анод, 9 – катод, 10 – зажимное устройство

Установка работает следующим образом: откручивают гайки у зажимного устройства 10 и снимают крышку 1, после чего устанавливают втулку 2 для нанесения на ней покрытия, накрывают крышкой 1, проверяя центрирование анода 8, после чего закрепляют крышку зажимным устройством 10. На втулку 2 закрепляется катод 9. Когда установка полностью в сборе, запускаются система подогрева электролита и система подачи электролита. Электролит подается через насос 6 по трубам к штуцерам 7. Насосный агрегат системы подачи электролита имеет следующие характеристики: максимальный расход – $2 \text{ м}^3/\text{ч}$; частота вращения приводного двигателя – $600 \dots 3000 \text{ об/мин}$; мощность приводного двигателя – $0,37 \text{ кВт}$.

За счет давления в гидросистеме и наклона штуцеров 7 турбулентные потоки электролита закручиваются по спирали и поднимаются вверх и от соударения с крышкой меняют направление, по внутренней части полого анода 9 возвращаются обратно в электролитическую ванну. Это позволяет сократить расход электролита и количество выбросов в окружающую среду. Кроме того,

преимуществом вихревого движения электролита вдоль поверхности наносимого покрытия является удаление дендритов, снижение пористости и повышение твердости покрытия. Газ, выделяющийся в процессе нанесения покрытия, поднимается вверх и благодаря вертикальному расположению установки не портит хромированную поверхность, как это бывает при горизонтальном или наклонном расположении, а отводится через отверстия в аноде в систему фильтрации.

Относительно определения концентрации серной кислоты в электролите хромирования следует отметить, что введение серной кислоты в раствор хромирования преследует основную цель увеличения плотности и износостойкости хромового покрытия. При слишком низкой концентрации серной кислоты образуются рыхлые осадки хрома, легко отслаивающиеся от детали. В то же время слишком высокая концентрация кислоты приводит к снижению выхода по току из-за интенсивного выделения водорода. Таким образом, необходимо определить оптимальную концентрацию серной кислоты в электролите.

Для этого была проведена серия экспериментов, в которых содержание серной кислоты по отношению к содержанию хромового ангидрида изменялось в широких пределах (рис. 4). Испытания проводились с использованием электролита, содержащего $150 \dots 350 \text{ г/л}$ хромового ангидрида при концентрации серной кислоты до 42 г/л , температура электролита на протяжении всего процесса – $65 \text{ }^\circ\text{C}$, плотность тока – 50 А/дм^2 . Объемный износ покрытий определялся в соответ-

ствии с методом предложенном J. Halling [20]: при сухом трении образца покрытия со скоростью 0,76 м/с по контртелу из стали Х12М. Из анализа данных (см. рис. 4) следует, что вне зависимости от содержания хромового ангидрида в электролите (150...350 г/л CrO_3) износ хромовых покрытий имеет одинаковый характер и может быть описан кривой, имеющей пологий минимум в диапазоне отношений 0,04...0,12 $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{CrO}_3$. Как следует из приведенных данных, в этом диапазоне концентрации серной кислоты наблюдается резкое повышение износостойкости покрытий. Таким образом, с целью повышения износостойкости хромовых покрытий концентрация серной кислоты в электролите должна находиться в диапазоне 0,04...0,12 по отношению CrO_3 .

Вследствие применения тока высокой плотности и определенной температуры электролита процесс хромирования имел большую производительность, чем традиционный, что объясняется зависимостью показателей процесса и качества покрытия от вышеуказанных параметров. А повышение концентрации электролита позволило повысить механические и эксплуатационные свойства получаемых покрытий. Уменьшение в электролите концентрации компонентов серной кислоты ниже 10 г/л и хромового ангидрида ниже 100 г/л ведет к снижению стабильности электролита хромирования и ухудшению качества покрытий. Увеличение же концентрации серной кислоты выше 23 г/л, а хромового ангидрида – 230 г/л ведет к уменьшению выхода хрома по току и рассеивающей способности электролита. Из-за этого требуемые механические свойства не достигаются.

После проведения испытаний проводились измерения микротвердости образцов при толщине покрытия 100 мкм. А также пористости, которая определялась по числу пятен коррозии на покрытии после выдержки в растворе, содержащем калия железосинеродистого – 3 г/л и натрия хлористого – 10 г/л согласно ГОСТ 9.302–88.

Также эксперименты показали, что покрытие, получаемое из концентрированного электролита при выбранном режиме, обладает следующими преимуществами по сравнению с покрытиями, получаемым из электролита с более высоким или более низким содержанием хромового ангидрида: микротвердость в пределах 960...1120 HV (у альтернативных электролитов 910...940 HV), пористость хромового покрытия в пределах 0,07...0,15 пор/см² (у альтернативных электролитов 1,5...3,5 пор/см²), тип хромового покрытия – коррозионностойкое и износостойкое (у альтернативных электролитов – износостойкое).

Таким образом, хромовые покрытия, полученные разработанным способом и с использованием электролита определенной концентрации, обладают высоким выходом хрома по току до 25 %, повышенной на 5...20 % твердостью и уменьшенной пористостью в 10...30 раз при образовании блестящих твердых осадков, что соответствует более коррозионностойкому и износостойкому покрытию. Это позволяет успешно решить задачу увеличения срока службы деталей.

Заключение

1. Рассмотрены особенности нанесения хромовых покрытий на внутренние поверхности цилиндрических деталей, а именно ограниченность применения установок в зависимости от типоразмеров деталей и неравномерность скорости осаждения хрома по длине детали. Из проведенного анализа можно сделать вывод, что для нанесения покрытия на внутренние поверхности необходимо разработать не только состав электролита, а также анод и установку, учитывающую все особенности данного процесса.

2. Установлено, что оптимальный состав электролита включает количество хромового ангидрида и серной кислоты в отношении 10 к 1 соответственно. Хромовые покрытия, полученные с использованием разработанного концентрированного электролита и способа хромирования, обладают высоким выходом хрома по току до 25 %, повышенной на 5...20 % твердостью и по-

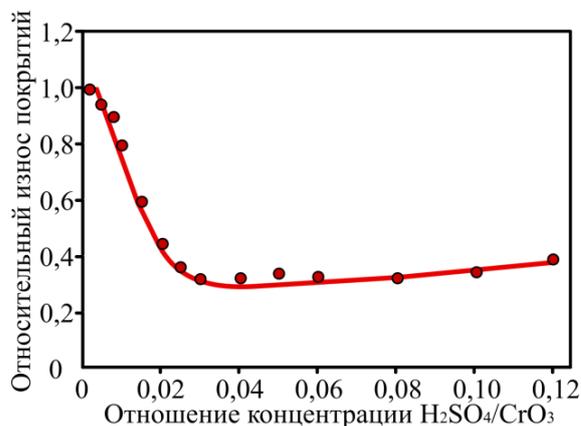


Рис. 4. Зависимость износа покрытия от отношения концентрации $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{CrO}_3$

ристостью в 10...30 раз ниже, чем у традиционных методов, при образовании блестящих твердых осадков, что соответствует более коррозионностойкому и износостойкому покрытию.

Литература

1. Шлугер, М.А. Гальванические покрытия в машиностроении: справочник: в 2 т. / М.А. Шлугер. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 1. – 240 с.
2. Schmidt, D. Ferritic-martensitic steels Improvement of the oxidation behavior in steam environments via diffusion coatings / D. Schmidt, M.C. Galetz, M. Schütze // *Surface and coatings technology*. – 2013. – V. 237. – P. 23–29.
3. Oxidation under pure steam Cr based protective oxides and coatings / A. Agüero, V. González, M. Gutiérrez, R. Muelas // *Surface and coatings technology*. – 2013. – V. 237. – P. 30–38.
4. Functional trivalent chromium electroplating of internal diameters / B. Kagajwala, T. Hall, M. Inman, (...), G. Cushnie, R. Taylor // *National Association for Surface Finishing Annual Conference and Trade Show 2012, SUR/FIN 2012*. – 2012. – Vol. 1. – P. 46–69.
5. Corrosion effects of plasma immersion ion implantation-enhanced Cr deposition on SAE 1070 carbon steel / C.B. Mello, M. Ueda, R.M. Oliveira, J.A. Garcia // *Surface and Coatings Technology*. – 2011. – No. 205. – P. S151–S156.
6. Солодкова, Л.Н. Электролитическое хромирование / Л.Н. Солодкова, В.Н. Кудрявцев; под ред. В.Н. Кудрявцева. – М.: ПХТУ, 2013. – 191 с.
7. Sarraf, S.H. Repairing the cracks network of hard chromium electroplated layers using plasma nitriding technique / S.H. Sarraf, M. Soltanieh, H. Aghajani // *Vacuum*. – 2016. – No. 127. – P. 1–9.
8. Effects of alumina addition and heat treatment on the behavior of Cr coatings electroplated from a trivalent chromium bath / H.-H. Sheu, C.-E. Lu, K.-H. Hou, M.-L. Kuo, M.-D. Ger // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. – 2015. – Vol. 48. – P. 73–80.
9. Effect of grinding on the sub-surface and surface of electrodeposited chromium and steel substrate / B. Weiss, A. Lefebvre, O. Sinot, M. Marquer, A. Tidu // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – Vol. 272. – P. 165–175.
10. Analysis of SEM digital images to quantify crack network pattern area in chromium electrodeposits / M. Vidal, M. Ostra, N. Imaz, E. Garcia-Lecina, C. Ubide // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – Vol. 285. – P. 289–297.
11. Experimental research on hard and crack-free electrodeposited chromium coatings / X.L. Li, X.H. Liu, H.B. Tian, W.J. Yuan // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 1044-1045. – P. 47–52. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1044-1045.47
12. Gruba, O.N. Influence of the Parameters of Galvanomechanical Chromium Plating on the Coating Quality and Process Productivity / O.N. Gruba, I.V. Shmidt, A.E. Gorodkova // *Solid State Phenomena*. – 2018. – Vol. 284. – P. 1173–1177.
13. Zherebtcov, D.A. Effect of Abrasive Tools in Galvanomechanical Treatment on the Roughness of the Deposited Chromium Layer / D.A. Zherebtcov, O.N. Gruba, K.R. Smolyakova // *Solid State Phenomena*. – 2018. – Vol. 284. – P. 1178–1183.
14. Galimov, D.M. Methods for determining the quality of galvanic chromium coating / D.M. Galimov, D.V. Ardashev, A.A. Dyakonov // *Solid State Phenomena*. – 2018. – Vol. 284. – P. 1307–1312.
15. Дасоян, М.А. Оборудование цехов электрохимических покрытий. – 3-е изд., перераб. и доп. / М.А. Дасоян, И.Я. Пальмская. – Л.: Машиностроение, 1979. – 287 с.
16. Плеханов, М.Ф. Расчет и конструирование устройств для нанесения гальванических покрытий / М.Ф. Плеханов. – М.: Машиностроение, 1988. – 345 с.
17. Патент СССР SU128251 A1 Приспособление для хромирования и анодирования внутренних поверхностей цилиндрических деталей / Н.М. Антонов. 1 июня 1959 г.
18. Патент СССР SU169369A1 Способ размерного хромирования внутренней поверхности цилиндрических деталей / М.А. Шлугер, В.А. Казаков / 3 ноября 1965 г.
19. Патент РФ 2586957 Способ электролитического хромирования внутренней поверхности труб / А.С. Жарков, В.Н. Беляев, А.Ю. Козлюк, А.С. Андреев – заявл. и патентообл. АО «ФНПЦ» Алтай» – №2014151542, 18 декабря 2014 г.
20. Halling J. A cross cylinder wear machine and its use in the study of severe wear of brass on mild steel / J. Halling // *Wear*. – 1961. – Vol. 4. – P. 22–31.

Ардашев Дмитрий Валерьевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технологии автоматизированного машиностроения, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, ardashev dv@susu.ru

Поступила в редакцию 17 сентября 2021 г.

DOI: 10.14529/engin210304

THE METHOD OF APPLYING A HARD CHROMIUM COATING TO INTERNAL CYLINDRICAL SURFACES

D.V. Ardashev, ardashev dv@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Chromium plating processes are considered in relation to the inner surfaces of cylinders of hydraulic drives with hydrostatic guides. The main factors that reduce the productivity of electrochemical chromium deposition, regardless of the type of surface, are analyzed, namely, the use of chromic acid with active anions with a low scattering ability as an electrolyte, the use of insoluble anodes and high-density currents. The features of chrome plating of the inner surfaces of the hydraulic cylinder, namely, the limited use of installations depending on the size of the parts and the unevenness of the deposition rate of chromium along the length of the part. An installation has been developed for coating internal surfaces, which includes a cathode, anode, a tank and a pipeline. Distinctive features of the installation are the way of feeding the electrolyte at an angle to the horizontal, which allows the electrolyte to be supplied in the form of a turbulent flow swirling along a helical path, and the body of the installation, which is a chrome-plated part. In the process of work, experimental studies were carried out to select the modes of applying a hard chromium coating to the inner surfaces of the hydraulic cylinder. As a result of the work, the optimal ratio of chromic anhydride and sulfuric acid in the electrolyte composition, which is 10:1, respectively, and the modes of its application were determined. Chromium coatings obtained using the developed concentrated electrolyte and chromium plating method have increased hardness by 5...20 % and reduced porosity by 10...30 times with the formation of shiny solid deposits, which corresponds to a corrosion-resistant and wear-resistant coating.

Keywords: chrome plating, inner surfaces, cylindrical surfaces, chrome plating.

References

1. Shluger M A. *Gal'vanicheskiye pokrytiya v mashinostroyenii: Spravochnik* [Galvanic coatings in mechanical engineering: Handbook]. Moscow, *Mashinostroyeniye*, 1985. 240 p.
2. Schmidt D., Galetz M.C., Schütze M. Ferritic-martensitic steels Improvement of the oxidation behavior in steam environments via diffusion coatings. *Surface and coatings technology*, 2013, vol. 237, pp. 23–29.
3. Agüero A., González V., Gutiérrez M., Muelas R. Oxidation under pure steam Cr based protective oxides and coatings. *Surface and coatings technology*, 2013, vol. 237, pp. 30–38.
4. Kagajwala B., Hall T., Inman M., (...), Cushnie G., Taylor R. Functional trivalent chromium electroplating of internal diameters. *National Association for Surface Finishing Annual Conference and Trade Show 2012, SUR/FIN*, 2012, vol. 1, pp. 46–69.
5. Mello C.B., Ueda M., Oliveira R.M., Garcia J.A. Corrosion effects of plasma immersion ion implantation-enhanced Cr deposition on SAE 1070 carbon steel. *Surface and Coatings Technology*, 2011, no. 205, pp. S151–S156.
6. Solodkova L.N., Kudryavtsev V.N. (ed.) *Elektroliticheskoye khromirovaniye* [Electrolytic chromium plating]. Moscow, 2013. 191 p.
7. Sarraf S.H., Soltanieh M., Aghajani H. Repairing the cracks network of hard chromium electroplated layers using plasma nitriding technique. *Vacuum*, 2016, no. 127, pp. 1–9.

8. Sheu H.-H., Lu C.-E., Hou K.-H., Kuo M.-L., Ger M.-D. Effects of alumina addition and heat treatment on the behavior of Cr coatings electroplated from a trivalent chromium bath. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2015, vol. 48, pp. 73–80.
9. Weiss B., Lefebvre A., Sinot O., Marquer M., Tidu A. Effect of grinding on the sub-surface and surface of electrodeposited chromium and steel substrate. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 272, pp. 165–175.
10. Vidal M., Ostra M., Imaz N., Garcia-Lecina E., Ubide C. Analysis of SEM digital images to quantify crack network pattern area in chromium electrodeposits. *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 285, pp. 289–297.
11. Li X.L., Liu X.H., Tian H.B., Yuan W.J. Experimental research on hard and crack-free electrodeposited chromium coatings. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1044–1045, pp. 47–52. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1044-1045.47
12. Gruba O.N., Shmidt I.V., Gorodkova A.E. Influence of the Parameters of Galvanomechanical Chromium Plating on the Coating Quality and Process Productivity. *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 284, pp. 1173–1177.
13. Zherebtcov D.A., Gruba O.N., Smolyakova K.R. Effect of Abrasive Tools in Galvanomechanical Treatment on the Roughness of the Deposited Chromium Layer. *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 284, pp. 1178–1183.
14. Galimov D.M., Ardashev D.V., Dyakonov A.A. Methods for determining the quality of galvanic chromium coating. *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 284, pp. 1307–1312.
15. Dasoyan M.A., Palmskaya I.Ya. *Oborudovaniye tsekhov elektrokhimicheskikh pokrytiy* [Equipping shops for electrochemical coating]. Leningrad Mechanical Engineering, 1979. 287 p.
16. Plekhanov M.F. *Raschet i konstruirovaniye ustroystv dlya naneseniya gal'vanicheskikh pokrytiy* [Calculation and design of devices for applying electroplated coatings]. Moscow, Engineering, 1988. 345 p.
17. Antonov N.M. *Ustroystvo dlya khromirovaniya i anodirovaniya vnutrennikh poverkhnostey tsilindricheskikh detaley* [Device for chrome plating and anodizing the internal surfaces of cylindrical parts]. USSR Patent SU128251 A1, 1 June 1959.
18. Schluger M.A., Kazakov V.A. *Method for dimensional chromium plating of the inner surface of cylindrical parts* [Method for dimensional chromium plating of the inner surface of cylindrical parts]. USSR Patent SU169369A1, 3 November 1965.
19. Zharkov A.S., Belyaev V.N., Kozlyuk A.Yu., Andreyev A.S. *Sposob elektroliticheskogo khromirovaniya vnutrenney poverkhnosti trub* [The method of electrolytic chromium plating of the inner surface of the pipes]. Russian Federation Patent 2586957, 2014151542, 18 December 2014.
20. Halling J. A cross cylinder wear machine and its use in the study of severe wear of brass on mild steel. *Wear*, 1961, vol. 4, pp. 22–31.

Received 17 September 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ардашев, Д.В. Метод нанесения твердохромового покрытия на внутренние цилиндрические поверхности / Д.В. Ардашев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 45–52. DOI: 10.14529/engin210304

FOR CITATION

Ardashev D.V. The Method of Applying a Hard Chromium Coating to Internal Cylindrical Surfaces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 45–52. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin210304