

УДК 621.9.047

Мукминов Дамир Радикович магистрант, Уфимский государственный
нефтяной технический университет, Россия, г. Уфа

**ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРУБЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ: ПРОБЛЕМА
РАВНОМЕРНОСТИ ОБРАБОТКИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОДХОДЫ
К ЕЁ РЕШЕНИЮ**

Аннотация

В работе рассмотрена общая для ряда отраслей задача финишной обработки внутренних поверхностей трубчатых деталей и каналов малого диаметра при значительной их длине. Показано, что среди методов финишной обработки электрохимическое полирование наиболее полно отвечает требованиям к таким поверхностям, однако при больших отношениях длины к диаметру сталкивается с осевой неравномерностью качества, причиной которой является нарастание диффузионного пограничного слоя вдоль оси течения электролита. Проанализированы существующие конструктивные решения и показана их ограниченность. Рассмотрены два перспективных подхода к устранению неравномерности — управление массопереносом наложением локализованного движущегося магнитного поля и применение формообразующего жидкометаллического катода, повторяющего геометрию канала. Проведено сопоставление подходов и очерчены области их предпочтительного применения, в том числе для деталей нефтегазового оборудования.

Ключевые слова: электрохимическое полирование, внутренние поверхности, трубчатые детали, равномерность обработки, диффузионный слой, магнитное поле, жидкометаллический катод, шероховатость.

Annotation

The paper addresses a problem common to several industries — finishing of internal surfaces of tubular parts and small-diameter channels of considerable length. Among finishing methods, electrochemical polishing is shown to best meet the requirements for such surfaces; however, at high length-to-diameter ratios it faces axial non-uniformity of quality caused by the growth of the diffusion boundary layer along the electrolyte flow axis. Existing structural solutions are analyzed and their limitations are demonstrated. Two promising approaches to eliminating non-uniformity are considered — control of mass transfer by applying a localized moving magnetic field, and the use of a shape-forming liquid-metal cathode replicating the channel geometry. The approaches are compared and their preferable application areas are outlined, including parts of oil and gas equipment.

Keywords: electrochemical polishing, internal surfaces, tubular parts, machining uniformity, diffusion layer, magnetic field, liquid-metal cathode, surface roughness.

Современное машиностроение всё чаще сталкивается с задачей, которая выглядит частной, но решается с большим трудом: довести до высокого класса чистоты внутреннюю поверхность узкого и длинного канала. Снаружи деталь обработать несложно, а вот канал диаметром в единицы и первые десятки миллиметров при длине в сотни миллиметров, да ещё с изгибами или сложной формой сечения, обычным инструментом практически недоступен. Между тем именно от состояния внутренней поверхности зависит работа множества ответственных узлов — гидравлических линий управления, трубопроводов подачи реагентов, прецизионных каналов следящих систем. Особенно остро вопрос стоит в нефтегазовом оборудовании, где гладкая стенка снижает осаждение парафинов, асфальтенов и солей, а обогащённый хромом поверхностный слой повышает стойкость к коррозии в средах с сероводородом и углекислым газом.

Требуемый уровень шероховатости для таких поверхностей высок: для приборных и импульсных линий он составляет R_a не более 0,8 мкм, а для прецизионных гидравлических каналов — R_a порядка 0,1–0,4 мкм [1].

Достижение этих значений на внутренней поверхности узкого длинного канала традиционными механическими методами осложнено или попросту невозможно: инструмент либо не вводится в канал, либо создаёт неравномерное давление в местах изгибов, наводит наклёп и растягивающие остаточные напряжения, а абразивные методы вдобавок шаржируют поверхность частицами.

На этом фоне электрохимическое полирование (ЭХП) выделяется как метод, отвечающий большинству требований одновременно. Растворение металла идёт бесконтактно и управляемо, поверхность не получает растягивающих напряжений, а на ней формируется обогащённый хромом пассивный слой [2]. В основе метода лежит анодное растворение в режиме диффузионного контроля: у поверхности образуется вязкий слой продуктов растворения, и поскольку над микровыступами он тоньше, чем над впадинами, выступы растворяются быстрее — рельеф сглаживается. Процесс при этом удерживают на так называемом плато предельного тока, открытом ещё в работах П. Жаке и развитом впоследствии в теории электрохимической обработки.

Однако у ЭХП есть слабое место, которое проявляется именно на длинных каналах. Электролит входит в канал свежим, но по мере движения вдоль оси насыщается продуктами анодного растворения, и толщина диффузионного пограничного слоя нарастает от входа к выходу. Вместе с ней смещается и режим обработки: если у входа процесс идёт в середине полирующего плато, то ближе к выходу он сползает в сторону травления. В результате при больших отношениях длины канала к его диаметру возникает осевая неравномерность — один участок уже перетравлен, другой ещё недополирован. Это и есть главная нерешённая проблема ЭХП длинных каналов.

За последние десятилетия предложен ряд решений этой проблемы. Их удобно представить сводно (таблица 1).

Таблица 1 — Существующие решения проблемы осевой неравномерности ЭХП

Решение / источник	Принцип	Ограничение
Распределённый токоподвод [3]	Несколько точек подвода тока по длине	Громоздкая оснастка
Подвижный катод [4]	Перемещение катода вдоль канала	Усложнение конструкции
Адаптивное управление	Регулировка по датчикам положения	Сложная система управления
Подбор электролита [5]	Изменение состава и вязкости раствора	Стоимость, вязкость

Общая черта всех этих решений в том, что они борются со следствиями: перераспределяют ток или переносят зону обработки, но не воздействуют на физическую причину — нарастание диффузионного слоя по длине канала. Между тем существуют подходы, нацеленные именно на причину. Ниже рассмотрены два из них, разрабатываемые автором и существенно различающиеся по принципу.

Подход первый — управление массопереносом магнитным полем. Идея состоит в том, чтобы охватить участок канала кольцевой катушкой и перемещать её вдоль канала вместе с зоной обработки (рисунок 1). Катушка создаёт на коротком участке магнитное поле, направленное вдоль оси. Ток ЭХП в кольцевом зазоре течёт радиально — от стенки-анода к катоду; при наложении продольного поля на радиальный ток возникает сила Лоренца, направленная по касательной к окружности. Под её действием электролит закручивается вокруг оси, обновляя тонкий слой раствора у стенки и выравнивая обработку по периметру.

Дополнительно у краёв катушки поле резко спадает, образуя градиент. На парамагнитные ионы железа, хрома и никеля в неоднородном поле действует сила, втягивающая их в область сильного поля; это создаёт осевое движение раствора у торцов зоны. Главное же, что само перемещение зоны вдоль канала уравнивает условия обработки: каждое сечение проходит через активную область поля в одинаковых условиях, независимо от того, насколько

электролит успел насытиться к этому месту. Тем самым подход прямо нацелен на причину осевой неравномерности.

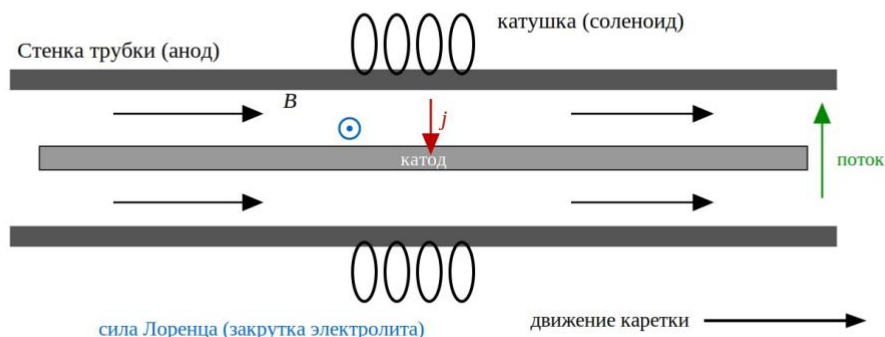


Рисунок 1 — Подход с управлением массопереносом магнитным полем

Возможность управлять массопереносом при ЭХП с помощью магнитного поля показана в работах группы Т. Hryniewicz и R. Rokicki [6, 7]. По их данным, наложение поля даёт дополнительное снижение шероховатости и обогащает пассивный слой хромом — отношение содержания хрома к железу возрастает от значения около 1,5 при обычном ЭХП до 2,2–6,2 при наличии поля, что коррелирует со снижением скорости коррозии. Существенно, что все известные исследования этой группы выполнены на плоских образцах в открытых ваннах со статическим однородным полем; перенос принципа на внутренние поверхности каналов с использованием локализованного движущегося поля в литературе не описан. Физическую основу для такого переноса дают также работы по магнитогидродинамической конвекции в электрохимических системах [8, 9].

Подход второй — формообразующий жидкометаллический катод. Если первый подход улучшает перемешивание электролита, то второй решает задачу иначе — через точное задание геометрии межэлектродного зазора. Трудность обработки каналов сложной формы в том, что твёрдый катод невозможно изготовить и ввести так, чтобы он повторял все изгибы и переменное сечение канала, выдерживая при этом равномерный зазор.

Жидкометаллический катод снимает это ограничение. Последовательность операций показана на рисунке 2.

Сначала внутренняя поверхность канала покрывается тонкой маской из поливинилового спирта (PVA) калиброванной толщины. Затем канал заполняется расплавом легкоплавкого сплава (сплав Розе), который застывает, точно повторяя форму канала поверх маски. После этого маска PVA вытравливается, освобождая между застывшим металлом и стенкой канала зазор, в точности равный толщине маски и одинаковый по всей сложной геометрии. В этот зазор подаётся электролит, а застывший металл служит катодом, повторяющим форму обрабатываемой поверхности. Ключевое преимущество подхода — равномерный зазор достигается на канале любой геометрии, что недостижимо для твёрдого катода.

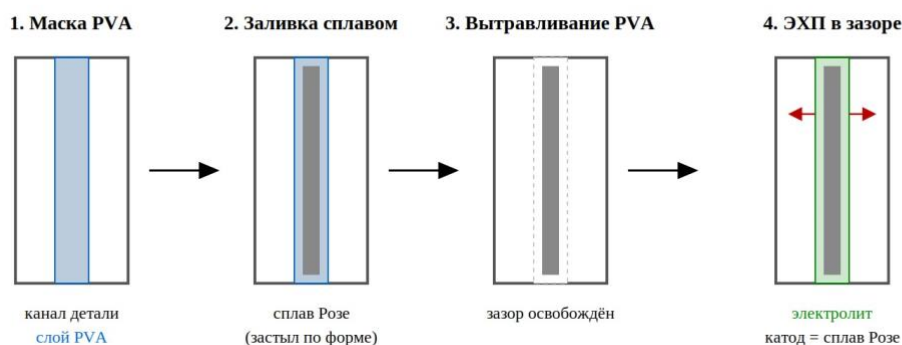


Рисунок 2 — Подход с формообразующим жидкометаллическим катодом

Технологическая привлекательность этого решения связана с доступностью средств: легкоплавкий сплав не требует точной механической обработки под каждую геометрию канала, а маска и её вытравливание выполняются простыми операциями. Это делает подход перспективным именно для мелкосерийного изготовления деталей со сложными внутренними каналами.

Сопоставление двух подходов удобно представить в виде таблицы (таблица 2). Видно, что они не конкурируют, а дополняют друг друга, атакуя проблему равномерности с разных сторон.

Таблица 2 — Сравнение рассмотренных подходов

Признак	Магнитное поле	Жидкометаллический катод
Чем достигается равномерность	перемешивание электролита у стенки	точный и одинаковый зазор по всей форме
Катод	твёрдый коаксиальный	жидкометаллический, формообразующий
Сильная сторона	прямые длинные трубки, обогащение хромом	каналы сложной геометрии
Предпочтительная область	трубки с большим L/D	фасонные каналы, где твёрдый катод не ввести

Таким образом, проблема осевой неравномерности при электрохимическом полировании внутренних поверхностей трубчатых деталей, обусловленная нарастанием диффузионного пограничного слоя по длине канала, может решаться воздействием на саму её причину. Рассмотренные подходы — управление массопереносом локализованным движущимся магнитным полем и применение формообразующего жидкометаллического катода — реализуют это воздействие принципиально по-разному: первый через усиление перемешивания у поверхности анода, второй через точное задание геометрии межэлектродного зазора. Первый подход предпочтителен для прямых длинных трубок и дополнительно обогащает поверхность хромом, второй — для каналов сложной формы, недоступных твёрдому катоду. Оба подхода применимы к прецизионным трубчатым деталям нефтегазового оборудования, где сочетание низкой шероховатости и повышенной коррозионной стойкости отвечает условиям эксплуатации в агрессивных средах. Дальнейшая работа направлена на экспериментальную проверку и количественное сопоставление эффективности обоих подходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. — М.: Стандартиформ, 2018. — 11 с.
2. Hryniewicz T., Rokicki R., Rokosz K. Magneto-electropolishing for metal surface modification // Transactions of the Institute of Metal Finishing. — 2007. — Vol. 85, № 6. — P. 325–332.

3. Pugh S.L. Method for internally electropolishing tubes: пат. US4705611 США. — 1987.
4. Wang Y.S., Chen J.L. Electropolishing process means for an inner surface of a long tube: пат. US6660138B2 США. — 2003.
5. Zou C., Zhang Q., Li H. Using the Ethaline electropolishing method on the internal surface of 316L tubes // *Materials*. — 2024. — Vol. 17, № 19. — P. 4789.
6. Hryniewicz T., Rokosz K., Rzakiewicz S., Raaen S. XPS analysis of nanolayers obtained on AISI 316L stainless steel after magnetoelectropolishing // *World Scientific News*. — 2016. — Vol. 37. — P. 232–248.
7. Rokicki R. Apparatus and method for enhancing electropolishing utilizing magnetic fields: пат. US7632390B2 США. — 2009.
8. Bund A., Ispas A., Pohlmann S., Uhlemann M. In situ analysis of three-dimensional electrolyte convection during electrodeposition in magnetic gradient fields // *Analytical Chemistry*. — 2011. — Vol. 83, № 9. — P. 3349–3356.
9. Garcés-Pineda F.A. et al. Enhancement of mass transport by magnetic field effects // *Nature Communications*. — 2024. — Vol. 15. — P. 2867.
10. Квятковская Л.А. и др. Электрохимическое полирование коррозионностойких сталей в фосфорнокислых электролитах // *Известия вузов*. — 2025. (в печати).

Mukminov D.R.

Ufa State Petroleum Technological University, Russia, Ufa

References

1. GOST 2789-73. Surface roughness. Parameters and characteristics. Moscow, Standartinform, 2018, 11 p.
2. Hryniewicz T., Rokicki R., Rokosz K. Magnetoelectropolishing for metal surface modification. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 2007, vol. 85, no. 6, pp. 325–332.

3. Pugh S.L. Method for internally electropolishing tubes. Patent US4705611, 1987.
4. Wang Y.S., Chen J.L. Electropolishing process means for an inner surface of a long tube. Patent US6660138B2, 2003.
5. Zou C., Zhang Q., Li H. Using the Ethaline electropolishing method on the internal surface of 316L tubes. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 19, p. 4789.
6. Hryniewicz T., Rokosz K., Rzadkiewicz S., Raaen S. XPS analysis of nanolayers obtained on AISI 316L stainless steel after magnetoelectropolishing. *World Scientific News*, 2016, vol. 37, pp. 232–248.
7. Rokicki R. Apparatus and method for enhancing electropolishing utilizing magnetic fields. Patent US7632390B2, 2009.
8. Bund A., Ispas A., Pohlmann S., Uhlemann M. In situ analysis of three-dimensional electrolyte convection during electrodeposition in magnetic gradient fields. *Analytical Chemistry*, 2011, vol. 83, no. 9, pp. 3349–3356.
9. Garcés-Pineda F.A. et al. Enhancement of mass transport by magnetic field effects. *Nature Communications*, 2024, vol. 15, p. 2867.
10. Kvyatkovskaya L.A. et al. Electrochemical polishing of corrosion-resistant steels in phosphoric acid electrolytes. *Izvestiya Vuzov*, 2025 (in press).