

Изучение рассеивающей способности сульфатного электролита для электролитно-плазменной полировки

С. А. Силкин

Костромской госуниверситет, г. Кострома, 156005, Россия
e-mail: longamin@mail.ru

Поступила в редакцию 17.12.2024

После доработки 22.01.2025

Принята к публикации 27.01.2025

Разработана и апробирована методика расчета рассеивающей способности с использованием секционного анода для варианта электролитно-плазменной полировки как с учетом, так и без учета краевых эффектов. Показано увеличение рассеивающей способности электролита при усилении конвективных потоков в сульфатном электролите. Показано увеличение рассеивающей способности при уменьшении напряжения обработки, снижении температуры электролита и концентрации сульфата аммония в электролите. Максимальная рассеивающая способность (с учетом краевых эффектов) составляет 95% при напряжении обработки 250 вольт, температуре электролита 60 °С и концентрации сульфата аммония 3%.

Ключевые слова: электролитно-плазменная полировка, рассеивающая способность, секционный анод, распределение тока

УДК 621.7.047.7

<https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.1.024>

ВВЕДЕНИЕ

Электролитно-плазменная полировка – один из методов обработки поверхности металлов и сплавов с целью уменьшения ее волнистости, понижения шероховатости, придания блеска, а также повышения усталостной прочности [1].

Основные ее преимущества – скорость обработки, возможность полировки сложнопрофильных деталей, отсутствие влияния структурных компонентов сплава, а также возможность автоматизации обработки – все чаще привлекают внимание исследователей.

Электролитно-плазменная обработка широко используется в аэрокосмической отрасли, медицине, приборостроительной и электронной промышленности [1–3]. Также данный вид полировки применяется для изменения состояния поверхности после аддитивного производства и после ее упрочнения другими методами [4–8]. Сама полировка происходит в присутствии парогазовой оболочки, что значительно изменяет распределение тока в системе и требует разных подходов для учета распределения тока при обработке сложнопрофильных деталей [9–11]. Работ по измерению распределения тока по поверхности детали в литературных источниках не найдено. В другой отрасли применения электрического тока, гальваническом осаждении, довольно распространено изучение распределения тока в виде измерения рассеивающей способности электролита [12, 13]. Более того, существует

государственный стандарт, в котором описана методика измерения рассеивающей способности электролита для гальванического осаждения с использованием ячейки Молера [14].

Цель настоящей работы – адаптировать методику измерения рассеивающей способности к варианту электролитно-плазменной полировки и оценить распределение тока параметром рассеивающей способности в сульфатном электролите.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования рассеивающей способности (РС) электролита из нержавеющей стали AISI304 был изготовлен восьмисекционный анод (см. рис. 1). Сталь включает: С до 0,08%; Si до 1%; Mn до 2%; Ni до 8–11%; S до 0,03%; P до 0,045%; Cr до 18–20%; остальное Fe.

Каждая секция анода изолирована от другой слюдой и подключена к своему резистору (шунту) для измерения тока. Данные напряжения с шунтов оцифровываются аналого-цифровым преобразователем и передаются по беспроводной связи на компьютер, обеспечивая гальваническую развязку системы. На рисунках, представленных ниже, секции пронумерованы снизу вверх, таким образом, при погружении анода в ячейку для полировки нижняя (первая) секция находится на максимальной глубине, а верхняя (восьмая) – на минимальной.

Электролитно-плазменную полировку проводили в течение ~ 90 секунд (с начала

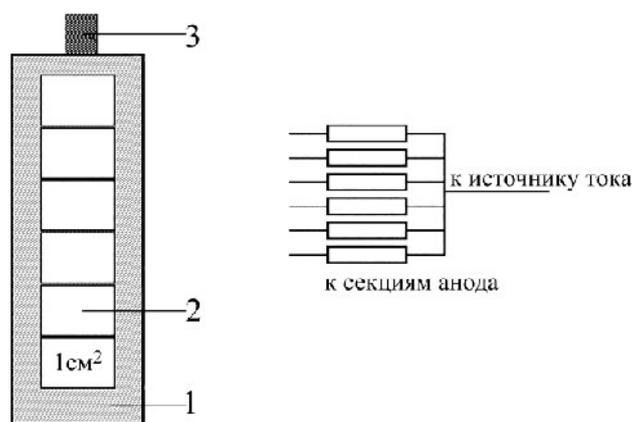


Рис. 1. Схема секционного анода: 1 – эпоксидная смола; 2 – аноды; 3 – изолированный токоподвод.

опускания анода) при напряжениях 250–350 вольт в водных электролитах сульфата аммония (ч.д.а.) 3 и 5%. Секционный анод подключался к положительному выходу источника постоянного тока и погружался до тех пор, пока полностью не покрывался слоем электролита толщиной 2 см. Температура электролита составляла 60, 80±2 °С. Гидродинамические условия контролировались при перемешивании магнитной мешалкой и при естественной конвекции, без магнитной мешалки.

Расчет рассеивающей способности по току велся по формуле (1), взятой из стандарта для гальванических покрытий ГОСТ 9.309-86 [14]:

$$PC = \left(1 - \frac{\sum_{n=1}^{10} |b_n - 1|}{6,37} \right) \times 100\%, \quad (1)$$

$$b_n = \frac{b}{b_{cp}}, \quad (2)$$

где 6,37 – коэффициент, отвечающий за первичное распределение тока в ячейке для 10-секционного катода (в данной работе были использованы значения для 8- и 6-секционного анода); b_n – распределение токов, рассчитываемое как отношение тока на конкретной секции к среднему значению на всех секциях; b – значение тока на секции; b_{cp} – среднее арифметическое значение тока по всем секциям.

Было принято решение проводить расчет PC как с учетом в расчетах всех секций, так и без учета значений крайних секций (то есть без учета краевых эффектов первой и последней секций с целью их минимизации).

Величина рассеивающей способности, измеренная с использованием средних значений плотности тока всех сегментов за 30 секунд обработки (с 50 по 80 секунду), обозначается PC, а рассчитанная без учета первой и последней секции – PCm.

Вследствие того, что колебания плотности тока зависят не только от глубины, но и от влияния выделяющегося пара от нижних секций, было предложено анализировать коэффициенты вариации плотности тока секции как параметр, связанный с колебаниями тока, обусловленными колебаниями парогазовой оболочки.

Для измерения профиля поверхности использовался профилометр Mitutoyo SJ-410 (Япония).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлена зависимость плотности тока растворения каждого сегмента после его погружения и электролитно-плазменной полировки в 3% растворе сульфата аммония. Из представленной зависимости видно, что на каждом сегменте в процессе обработки значение тока не постоянно, а колеблется с достаточно высоким отклонением от среднего значения. Эта особенность поведения плотности тока (тока) связана с образованием пузырьков пара и колебаниями образующейся при полировке парогазовой оболочки. Также можно заметить, что среднее значение плотности тока для каждой из секций уменьшается при проведении полировки. В данном случае это связано с тем, что во время полировки температура электролита изменилась на два градуса. Так как более нагретому электролиту для закипания нужно меньше энергии, ток обработки уменьшается и происходит динамическая стабилизация среднего значения тока.

В последний момент времени замечен выброс плотности тока, обусловленный технической реализацией отключения системы от источника, и для расчетов он использоваться не будет.

На представленной на рис. 3 зависимости среднего значения плотности тока на каждом сегменте видно значительное отклонение от среднего значения плотности тока крайних сегментов. Заметно, что значение плотности тока

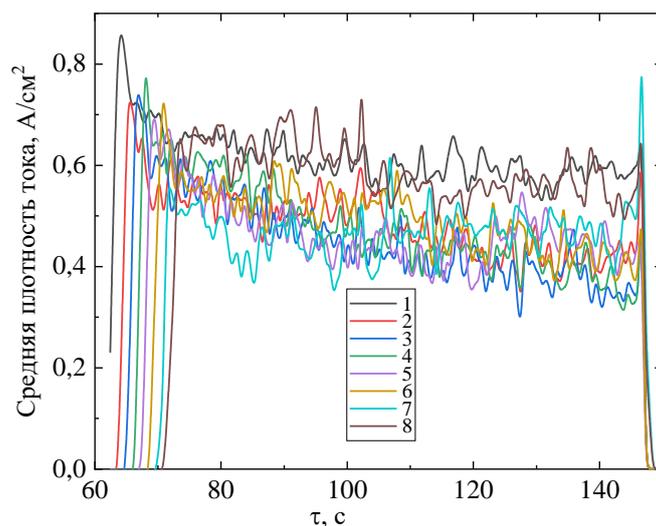


Рис. 2. Форма тока на секциях анода при полировке в сульфатном 3% электролите.

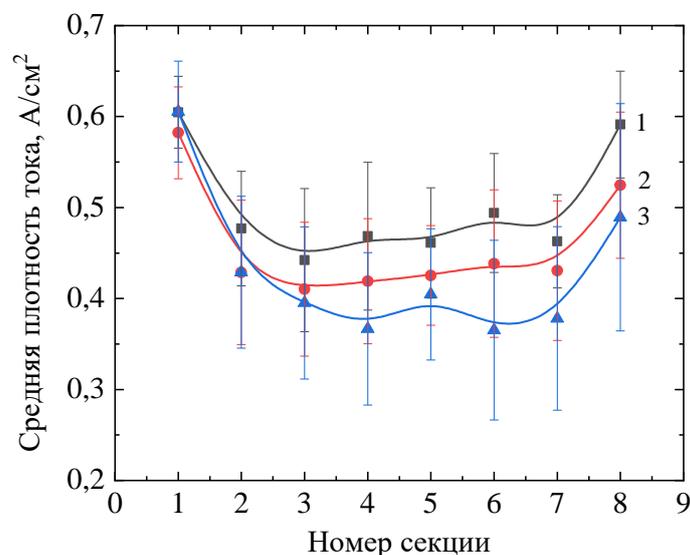


Рис. 3. Распределение средней анодной плотности тока по секциям в условиях изменяемой гидродинамики: 1 – свежеприготовленный электролит; 2 – проработка ~ 1000 Кл/л; 3 – проработка ~ 1000 Кл/л без мешалки.

на первом сегменте больше, чем на восьмом (верхнем) сегменте. Именно потому, что значения тока на крайних секциях сильно отличаются от значений тока на средних секциях, было принято решение ввести параметр РСт. Также на представленной зависимости можно увидеть влияние выработки (проработки) электролита и гидродинамических условий на распределение средней плотности тока. Видно, что при увеличении времени работы электролита (выработки) распределение тока по секциям более резкое и значение плотности тока на средних секциях меньше, чем в свежеприготовленном электролите. Это связывается с изменением рН при работе электролита. Именно для того, чтобы добиться более стабильного значения рН электролита, и проводится его проработка.

Гидродинамические параметры в системе тоже заметно влияют на распределение тока, действие схоже с действием рН, но обусловлено улучшением распределения тока за счет

уменьшения толщины парогазовой оболочки путем конденсации ее в электролите за счет перемешивания.

Влияние гидродинамических условий на распределение коэффициента вариации каждой секции представлено на рис. 4. Видно, что хотя значение тока на нижней секции и является самым большим, поскольку именно снизу толщина парогазовой оболочки самая маленькая, колебания тока минимальны. За счет того, что парогазовая оболочка утолщается кверху, так как образующийся пар от нижних сегментов поднимается вверх, видно увеличение коэффициентов вариации, которые отображают увеличение колебаний парогазовой оболочки при приближении к верхней части секционного анода. Описанное влияние особенно заметно в условиях естественной конвекции. Также можно сделать вывод, что используемая скорость магнитной мешалки достаточна для того, чтобы колебания толщины оболочки были практически

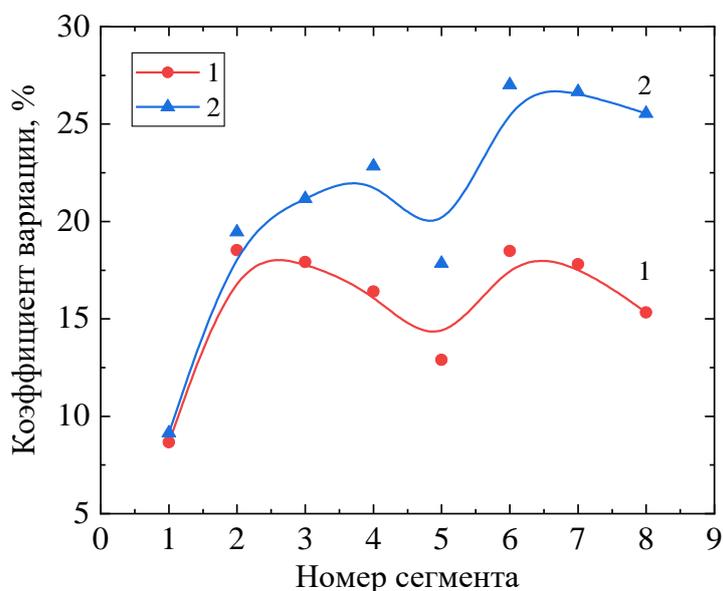


Рис. 4. Распределение коэффициента вариации анодной плотности тока по секциям в условиях изменяемой гидродинамики.

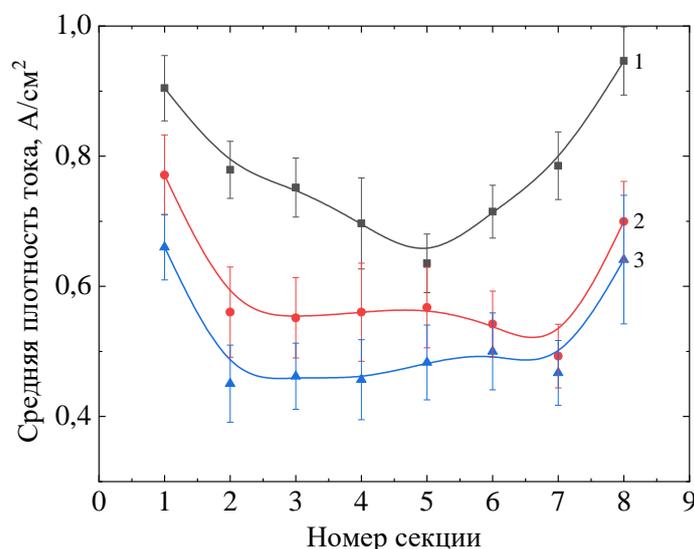


Рис. 5. Распределение средней анодной плотности тока по секциям при различном напряжении обработки: 1 – 250; 2 – 300; 3 – 350 В, температура электролита 80 °С.

равными по всей высоте образца, за исключением первого сегмента.

При увеличении напряжения обработки (рис. 5) при одинаковой температуре электролита происходит уменьшение величины среднего тока сегментов и изменение распределения тока по сегментам. Это изменение обусловлено тем, что напряжение обработки отвечает за формирование толщины парогазовой оболочки и процессов, происходящих в ней, и можно сделать вывод, что без учета крайних сегментов при данной температуре (80 °С) распределение тока более равномерно при обработке в диапазоне 300–350 вольт.

Концентрация сульфата аммония в электролите имеет достаточно большое влияние на распределение плотностей тока. Видно, что при повышении концентрации сульфата аммония (рис. 6) плотность тока на краях увеличивается и

само среднее значение плотности тока уменьшается, ухудшая распределение тока.

На основании полученных зависимостей средних плотностей тока на секциях анода была рассчитана РС в электролитах двух концентраций (табл. 1 и 2).

Из представленных в табл. 1 и 2 данных можно заметить увеличение рассеивающей способности при уменьшении напряжения обработки, снижении температуры электролита и концентрации сульфата аммония в электролите. Максимальное значение рассеивающей способности (с учетом краевых эффектов) составляет 95% при напряжении обработки 250 вольт, температуре электролита 60 °С и концентрации сульфата аммония 3%.

В электролите, содержащем 7% сульфата аммония, максимальное значение рассеивающей способности (с учетом/без учета краевых

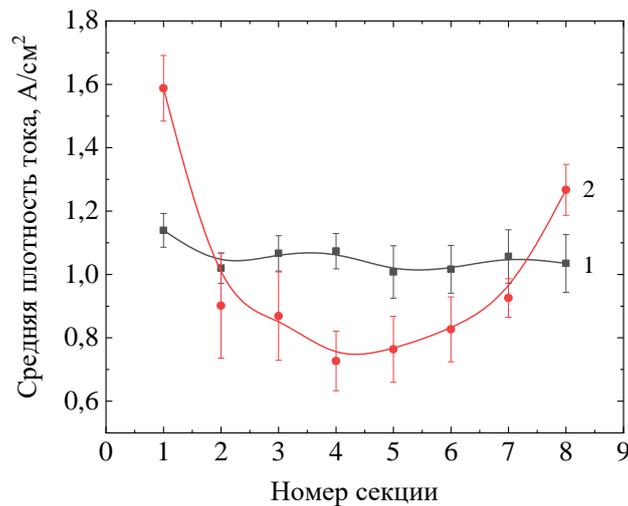


Рис. 6. Распределение средней анодной плотности тока по секциям при различной концентрации электролита: 1–3%; 2–7% (напряжение обработки 250 В, температура электролита 60 °С).

Таблица 1. Влияние напряжения обработки и температуры электролита на рассеивающую способность в 3% сульфате аммония

3%	60 °С		80 °С		100 °С	
	РС	РСm	РС	РСm	РС	РСm
U, В	95	96	84	90	35	91
250	95	96	84	90	35	91
300	87	88	81	95	59	95
350	90	95	79	95	50	89

Таблица 2. Влияние напряжения обработки и температуры электролита на рассеивающую способность в 7% сульфате аммония

7%	60 °С		80 °С	
	РС	РСm	РС	РСm
U, В	65	88	42	84
250	65	88	42	84
300	64	91	65	87
350	76	95	70	88

эффектов) составляет 76/95% при напряжении обработки 350 вольт и температуре электролита 60 °С.

ВЫВОДЫ

- Разработана методика расчета рассеивающей способности с использованием секционного анода как с учетом, так и без учета краевых эффектов.

- Показано повышение рассеивающей способности сульфатного электролита при увеличении гидродинамических условий.

- Показано увеличение рассеивающей способности при уменьшении напряжения обработки, снижении температуры электролита и концентрации сульфата аммония в электролите. Максимальная рассеивающая способность (с учетом краевых эффектов) составляет 95% при напряжении обработки 250 вольт, температуре электролита 60 °С и концентрации сульфата аммония 3%.

- Максимальная рассеивающая способность (с учетом/без учета краевых эффектов), измеренная в 7% электролите, составляет 76/95%

при напряжении обработки 350 вольт и температуре электролита 60 °С.

- Показано увеличение коэффициентов вариации плотности тока секций анода от глубины его погружения, что объясняется взаимозависимостью величины коэффициента корреляции с величиной колебаний парогазовой оболочки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-29-00716) Костромскому государственному университету.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Huang, Y., Wang, C., Ding, F., Yang, Y., et al., Principle, process, and application of metal plasma electrolytic polishing: a review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2021, vol.114, p. 1893. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07012-7>

2. Tamindarov, D.R., Smyslov, A.M. and Sidelnikov, A.V., Effect of electrolyte composition on plasma electrolytic polishing of titanium alloys, *Inorg. Mater.: Appl. Res.*, 2023, vol. 14, p. 732.
<https://doi.org/10.1134/S2075113323030437>
3. Liu, M.Y., Chen, T.H., Wu, W.C. and Chang, C.H., Effect of plasma electrolytic polishing technology on stainless steel surface composition and Cr/Fe. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Surface Enhancement (INCASE) 2023*. Maharjan, N., He, W. (eds). Singapore: Springer, 2024. p. 167.
https://doi.org/10.1007/978-981-99-8643-9_18
4. Ge, J., Pillay, S. and Ning, H., Post-process treatments for additive-manufactured metallic structures: A comprehensive review, *J. Mater. Eng. Perform.*, 2023, vol. 32, p. 7073.
<https://doi.org/10.1007/s11665-023-08051-9>
5. Kusmanov, S.A., Tambovskii, I.V., Mukhacheva, T.L., Silkin, S.A., et al., Electrolyte-plasma nitriding of austenitic stainless steel under cathodic and anodic polarity, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2023, vol. 59, p. 582.
<https://doi.org/10.3103/S1068375523050101>
6. Belkin, P.N., Silkin, S.A., D'yakov, I.G., Burov, S.V., et al., Influence of plasma electrolytic polishing conditions on surface roughness of steel, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2020, vol. 56, p. 55.
<https://doi.org/10.3103/S1068375520010032>
7. Kusmanov, S.A., Tambovskiy, I.V., Mukhacheva, T.L., Silkin, S.A., et al., Cathodic boronitrocarburizing and anodic polishing of low-carbon steel in plasma electrolysis, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2023, vol. 59, p. 264.
<https://doi.org/10.3103/S1068375523030122>
8. Kusmanov, S.A., Silkin, S.A. and Belkin, P.N., Effect of plasma-electrolytic polishing on the corrosion resistance of structural steels after their anodic saturation with nitrogen, boron, and carbon, *Russ. J. Electrochem.*, 2020, vol. 56, p. 356.
<https://doi.org/10.1134/S1023193520040084>
9. Muratov, K.R., Gashev, E.A. and Ablyaz, T.R., Recommendations for electrolytic plasma polishing of chromium and titanium alloys, *Russ. Eng. Res.*, 2022, vol. 42, p. 829.
<https://doi.org/10.3103/S1068798X22080172>
10. Smirnov, A.S., Martysyuk, D.A. and Galinovskii, A.L., Effect of the initial electric current distribution on the metal dissolution rate at the plasma electrolytic polishing of a product, *Russ. Metall.*, 2023, p. 1853.
<https://doi.org/10.1134/S0036029523120352>
11. Ji, G., Ma, L. and Wu, L., Effect of the gas layer evolution on electrolytic plasma polishing of stainless steel, *Sci. Rep.* 2024, vol. 14, art. ID 22099.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-74263-1>
12. *Гальванические покрытия в машиностроении*. Справочник. Т. 1. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
13. Silkin, S.A., Belevskii, S.S., Gradinar', A.S., Petrenko, V.I., et al., Electrodeposition of nanocrystalline Co-W coatings from citrate electrolytes under controlled hydrodynamic conditions, part 3: The micro- and macrodistribution of the deposition rates, the structure, and the mechanical properties, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2010, vol. 46, p. 206.
<https://doi.org/10.3103/S1068375510030026>
14. ГОСТ 9.309-86. *Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия гальванические. Определение рассеивающей способности электролитов при получении покрытий*. Национ. стандарт Российской Федерации; изд. официальное; утв. и введ. в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 21 января 1986 г. № 155; дата введения 1987-01-01. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2005. 8 с.

Summary

A method for calculating the scattering capacity using a sectional anode for the electrolytic-plasma polishing variant, both with and without taking into account the edge effects, has been developed and tested. An increase in the scattering capacity of the electrolyte is shown to depend on both an increase in the hydrodynamic parameters of the sulfate electrolyte and a decrease in the processing voltage, in the electrolyte temperature, and in the concentration of ammonium sulfate in the electrolyte. The maximum scattering capacity (taking into account the edge effects) was found to be 95% at a processing voltage of 250 volts, an electrolyte temperature of 60 °C, and an ammonium sulfate concentration of 3%.

Keywords: electrolytic-plasma polishing, scattering capacity, sectional anode, current distribution