Изучение рассеивающей способности карбонатного электролита для электролитно-плазменной полировки

С. А. Силкин*, А. С. Перков, А. А. Ефременко

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

Поступила в редакцию 30.09.2025
После доработки 28.11.2025
Принята к публикации 05.12.2025

Исследована рассеивающая способность карбонатного электролита при электролитно-плазменной полировке (ЭПП) с использованием секционного анода. Экспериментально изучено влияние концентрации электролита 3 и 6%, температуры (60, 80, 100 °С), рабочего напряжения (250, 300, 350 В) и гидродинамических условий на распределение тока и стабильность процесса. Показано, что температура 80 °С обеспечивает максимальную стабильность рассеивающей способности, что важно для воспроизводимости обработки при нестабилизированном напряжении. Результаты работы расширяют понимание механизмов ЭПП в карбонатных электролитах и могут быть использованы для оптимизации обработки деталей сложной геометрии.

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

УДК 621.7.047.7
https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.2.12

ВВЕДЕНИЕ

Электролитно-плазменная полировка (ЭПП) является высокоэффективным методом финишной обработки, позволяющим существенно снижать шероховатость поверхности, придавать блеск и формировать функциональные пассивные слои на металлах и сплавах [1]. Ключевые преимущества метода, такие как высокая скорость обработки, возможность полировки сложнопрофильных деталей и отсутствие влияния структурных неоднородностей материала, обусловливают его широкое применение в аэрокосмической отрасли, медицине и точном приборостроении [1–3]. Особую актуальность ЭПП приобретает в качестве технологии постобработки изделий, полученных методами аддитивного производства, для устранения характерных дефектов поверхности [4, 5].

Физическая сущность процесса заключается в формировании вокруг анода стабильной парогазовой оболочки (ПГО), через которую протекает ток, определяющий интенсивность анодного растворения [6, 7]. Именно пространственное распределение плотности тока в этой оболочке является критическим фактором, определяющим равномерность обработки и итоговое качество поверхности [8]. Особую проблему представляет «краевой эффект» — концентрация тока на выступающих кромках, вершинах и, что особенно важно, на краях отверстий, что приводит к их неконтролируемому скруглению или локальному перетравливанию [9]. Для прецизионной обработки ответственных деталей, включая детали с отверстиями, необходимы не только знание интегральных параметров процесса, но и количественная оценка локального распределения тока [9].

Несмотря на значимость задачи, методики прямого измерения распределения тока при ЭПП развиты недостаточно. В то же время в смежной области гальванотехники для оценки рассеивающей способности электролитов успешно применяются стандартизированные методы, например, с использованием ячейки Моллера [10] или вращающегося цилиндрического электрода [11]. В последнее время предпринимаются попытки адаптации этих подходов к условиям ЭПП. В частности, проведены исследования распределения тока при полировке в сульфатных электролитах с использованием секционного анода [9]. Однако карбонатные электролиты, представляющие интерес благодаря своей экологичности и технологическим особенностям, в этом аспекте остаются практически не изученными [12, 13]. Отсутствуют данные о влиянии состава карбонатного электролита на параметр рассеивающей способности и, как следствие, на равномерность обработки геометрически сложных элементов.

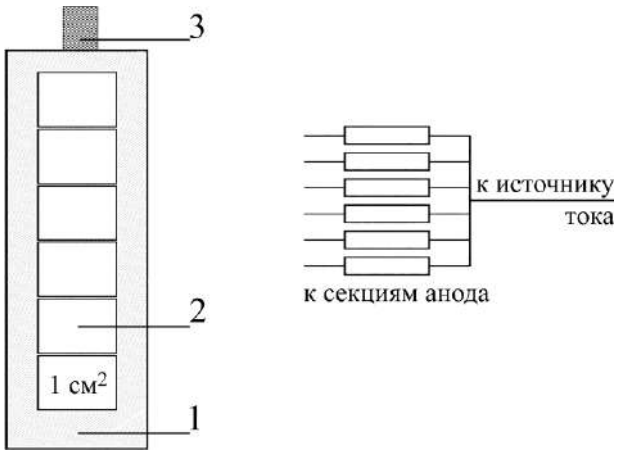


Рис. 1. Схема секционного анода: *1* – эпоксидная смола; *2* – аноды, *3* – изолированный токоподвод.

Цель настоящей работы – исследование распределения плотности тока при электролитно-плазменной полировке в карбонатном электролите. Для достижения поставленной цели была адаптирована методика оценки рассеивающей способности на основе модифицированной ячейки, позволяющая экспериментально определить распределение тока на секциях анода при различных режимах.

В задачи исследования входило установление влияния состава карбонатного электролита и режимов полировки на пространственное распределение плотности тока и оценка возможности управления равномерностью анодного стравливания материала с поверхностей сложной геометрии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования рассеивающей способности (РС) электролита в процессе электролитно-плазменной полировки был использован восьмисекционный анод (см. рис. 1), изготовленный из нержавеющей стали AISI304 (состав: C ≤ 0,08%; Si ≤ 1%; Mn ≤ 2%; Ni 8–11%; S ≤ 0,03%; P ≤ 0,045%; Cr 18–20%; Fe – остальное).

Каждый сегмент анода был электрически изолирован от соседних слюдяными прокладками и оснащен индивидуальным шунтом для точного измерения силы тока. Доступной для процесса полировки оставлена одна сторона анода. Сигналы напряжения с шунтов оцифровывались аналого-цифровым преобразователем и передавались по беспроводному каналу на компьютер, что обеспечивало гальваническую развязку измерительной цепи. При нумерации секций снизу вверх первая (нижняя) секция при погружении находилась на максимальной глубине, а восьмая (верхняя) – на минимальной.

Процесс полировки проводили в течение 90 секунд в 3 и 6% водном растворе карбоната натрия при рабочих напряжениях 250, 300, 350 В. Анод, подключенный к положительному полюсу источника питания, погружали в электролит вертикально, так чтобы толщина слоя раствора над ним составляла 20 мм. Катодом служила емкость из нержавеющей стали, в которой проводилась обработка, межэлектродное расстояние от рабочей стороны анода составляло 100 мм. Эксперименты выполняли при температуре электролита 60, 80 и 100 °С с отклонением не более двух градусов в условиях принудительного перемешивания магнитной мешалкой для равномерного распределения температуры по всему объему электролита.

Рассеивающую способность рассчитывали по методу, адаптированному из ГОСТ 9.309-86–и использованному ранее в [9]. Предложенная методика не претендует на точное воспроизведение абсолютных значений первичного распределения тока в ПГО, но обеспечивает корректное сравнение рассеивающей способности электролита при различных режимах обработки, что является главной целью настоящей работы.

Для минимизации краевых эффектов расчет РС выполняли двумя способами: 1) с учетом данных со всех секций (обозначается как РС) и 2) без учета значений крайних (первой и восьмой) секций (обозначается как РСm). За значения плотности тока принимались их средние величины, зафиксированные в интервале от 50-й до 80-й секунды обработки.

Учитывая, что колебания плотности тока на секциях обусловлены не только глубиной погружения, но и влиянием парогазовой оболочки, образующейся на нижерасположенных сегментах, для анализа был введен коэффициент вариации плотности тока. Данный параметр позволяет количественно оценить нестационарность процесса, связанную с динамикой парового слоя.

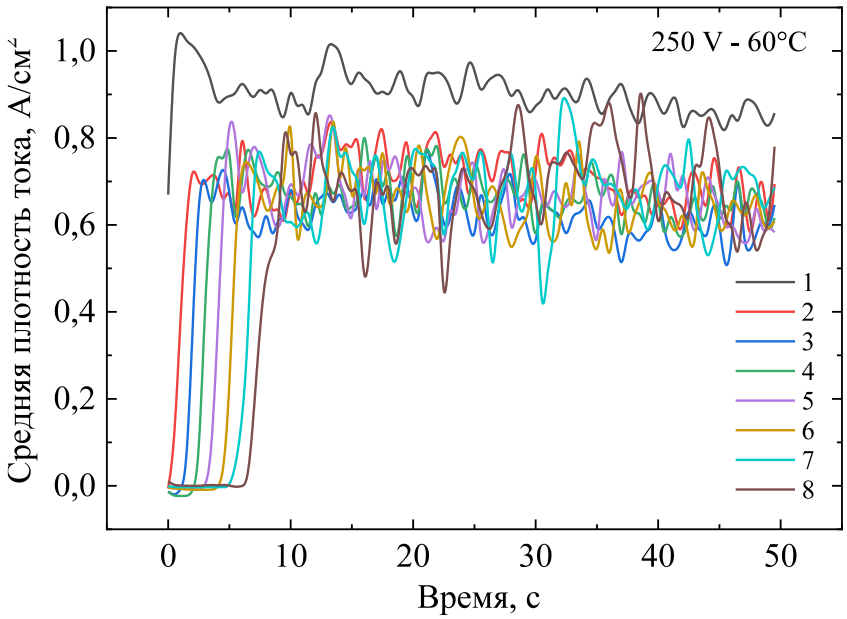


Рис. 2. Форма тока на секциях анода при полировке в карбонатном 3% электролите.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На представленной на рис. 2 зависимости плотности тока от времени полировки видно, что значение тока первого сегмента намного больше, чем плотность тока на остальных сегментах, это связано с максимально тонкой парогазовой оболочкой на нижнем сегменте и краевыми эффектами. Также краевые эффекты можно наблюдать и на последнем (восьмом) сегменте. Видно, что его значение не минимально, а колебания тока на нем одни из самых больших. Колебания плотности тока при обработке связаны с колебаниями парогазовой оболочки и образованием пузырьков пара, покидающих ее. На начальном этапе отмечено неравномерное возрастание тока на сегментах из-за погружения секционного анода.

Для изучения распределения плотности тока на сегментах были рассчитаны средние значения плотности тока и среднеквадратичное отклонение (указано на графике в качестве интервальных значений, рис. 3).

На представленных зависимостях явно видны превышения плотностей тока на крайних сегментах, а также относительно равномерное распределение тока на средних сегментах. При увеличении концентрации электролита заметно увеличение среднего тока при любых температурах, что в основном обусловлено повышением электропроводности электролита. Такие же результаты наблюдаются и при других напряжениях обработки.

Также можно отметить, что при повышении температуры электролита средняя плотность тока сегмента тоже растет, это связано с понижением энергетических затрат на испарение воды в парогазовой оболочке за счет снижения разницы температуры, необходимой для доведения электролита до кипения.

Нужно заметить, что за счет вертикального положения образца парогазовая оболочка составляет одно целое, даже на секционированном аноде выделяющийся пар на нижних сегментах поднимается выше, утолщая оболочку [7].

Коэффициент вариации (или относительное стандартное отклонение) демонстрирует величину колебаний тока, а следовательно, коррелирует с колебаниями толщины парогазовой оболочки (рис. 4). Видно, что минимальные колебания наблюдаются на первом сегменте, так как там самая малая толщина оболочки ввиду того, что нет поднимающегося пара с других сегментов. Также следует заметить, что при разных концентрациях электролита зависимость коэффициента вариации от номера сегмента (уровня заглубления образца) схожая, особенно при максимальных температурах электролита, где толщина оболочки максимальна.

При уменьшении уровня заглубления образца или увеличении количества сегментов под ним наблюдается рост коэффициента вариации и, подходя к последнему сегменту, где оболочка схлопывается, заметно снижение коэффициента вариации, а также тока (рис. 4), что подчеркивает влияние краевых эффектов.

За счет значительной величины тока через систему при обработке в 6% электролите общее выделение пара больше, что и вызывает длительное плато коэффициента вариации при максимальной температуре. Вероятно, при максимальной температуре происходит переход

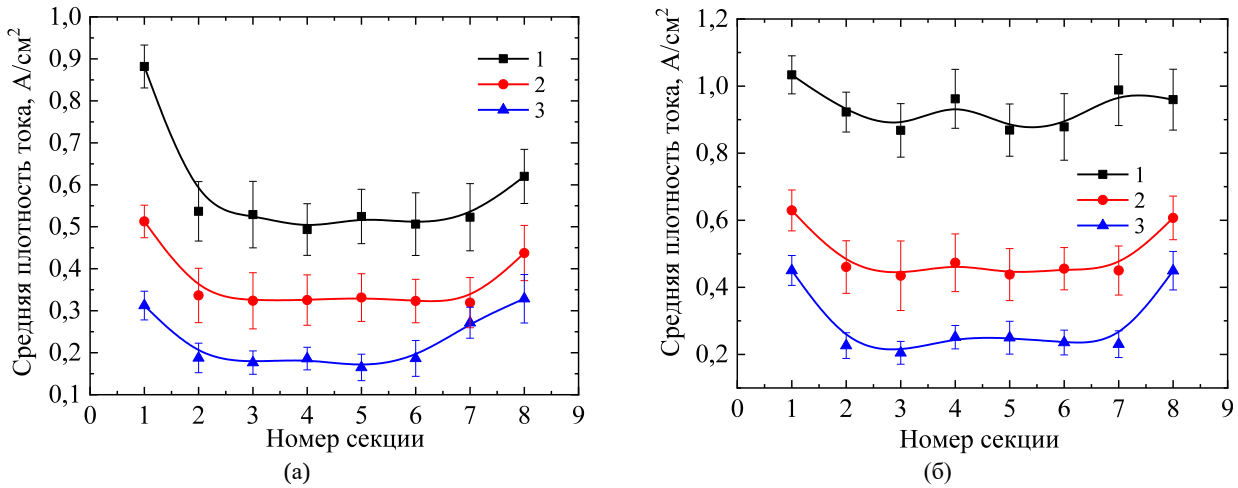


Рис. 3. Распределение средней анодной плотности тока по секциям при обработке с разной температурой электролита: *1* – 60; *2* – 80; *3* – 100°С. Концентрация электролита 3 (а) и 6% (б).

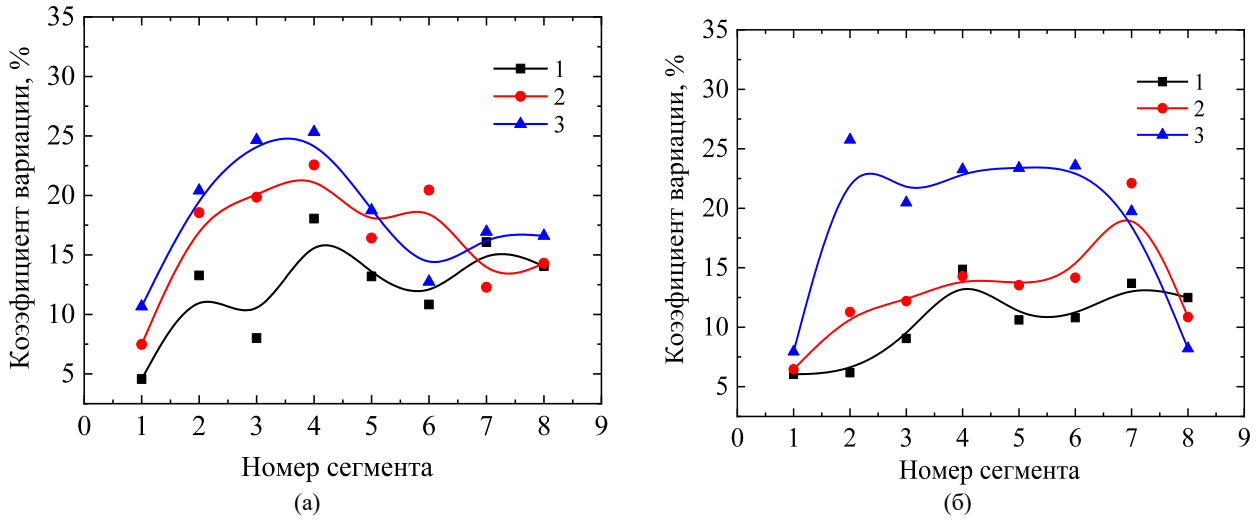


Рис. 4. Распределение коэффициента вариации анодной плотности тока по секциям в условиях разной температуры электролита: *1* – 60; *2* – 80; *3* – 100 °С. Концентрация электролита 3 (а) и 6% (б).

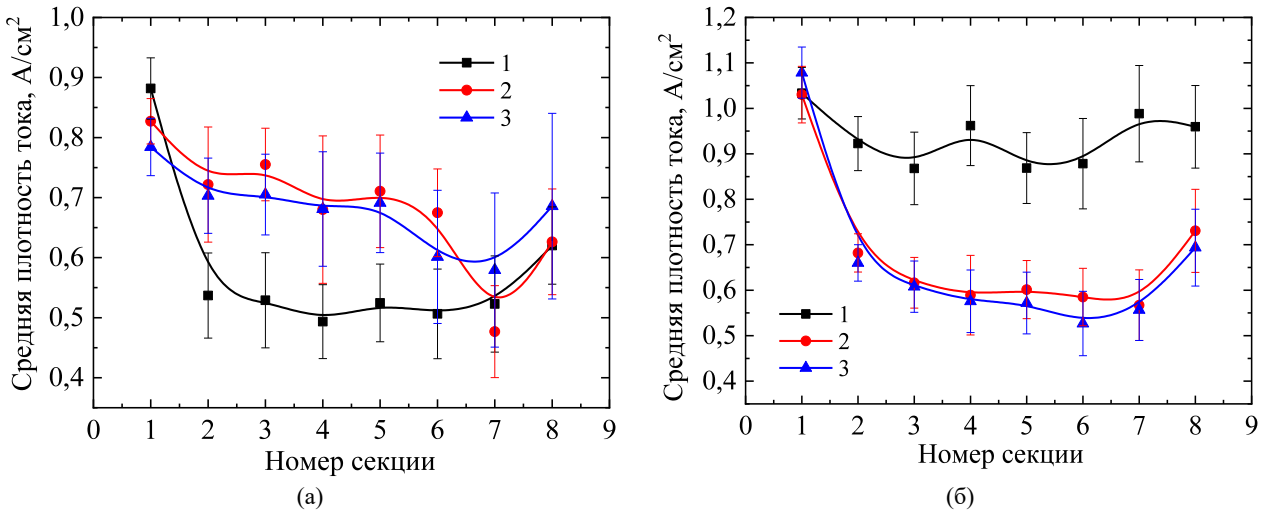


Рис. 5. Распределение средней анодной плотности тока по секциям при различном напряжении обработки: *1* – 250; *2* – 300, *3* – 350 В, температура электролита 60 ºС. Концентрация электролита 3 (а) и 6% (б).

от пленочного к пузырьковому кипению (или сильно повышается доля пузырькового кипения) и за счет этого величина коэффициента вариации достигает 20% и больше. А при 80 °С это значение достигается только на четвертом сегменте в электролите с низкой концентрацией и на седьмом сегменте в электролите с высокой.

При 60 °С есть существенное отличие в распределении плотности тока на сегментах от других температур (рис. 5). В остальных случаях

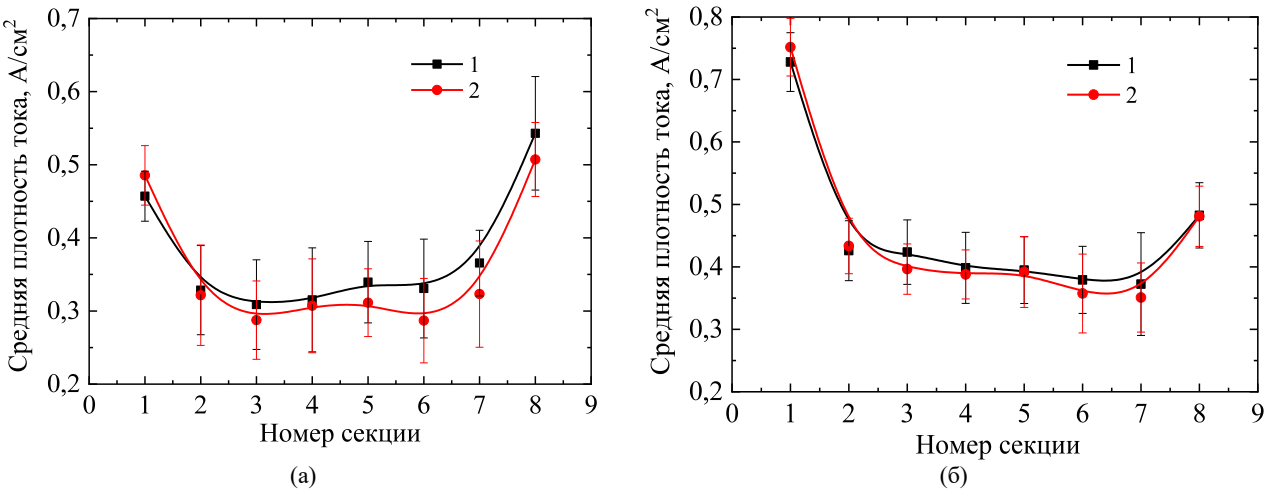


Рис. 6. Распределение коэффициента вариации анодной плотности тока по секциям в условиях изменяемой гидродинамики: *1* – принудительное перемешивание; *2*-без перемешивания. Концентрация электролита 3 (а) и 6% (б).

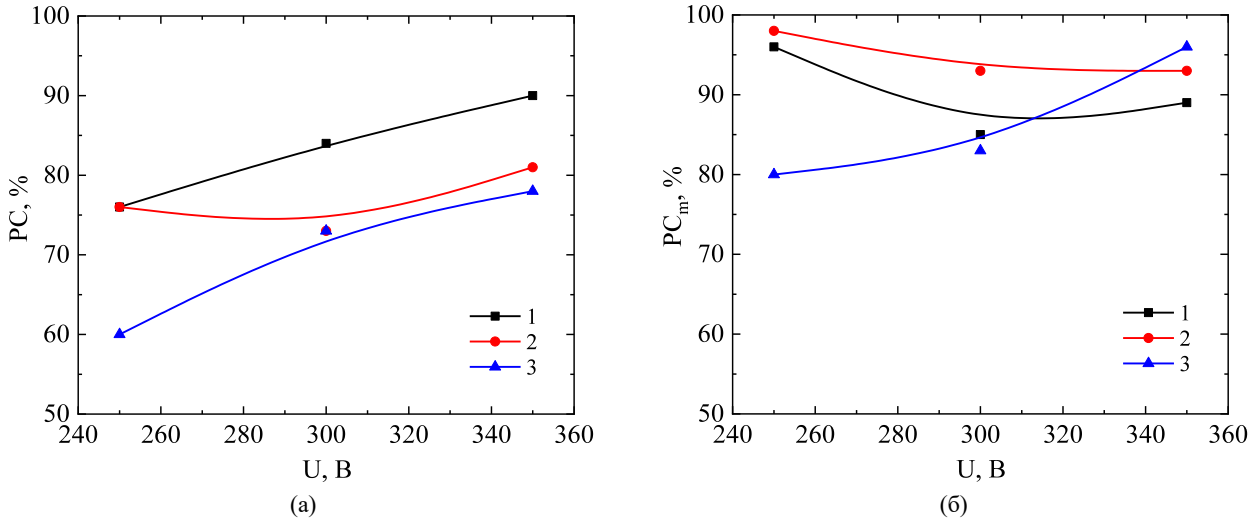


Рис. 7. Расчетные значения рассеивающей способности при различных температурах электролита: *1* – 60; *2* – 80; *3* – 100 °С. Концентрация электролита 3%, вариант расчета по 8 единичным секциям (а) и 6 секциям (б).

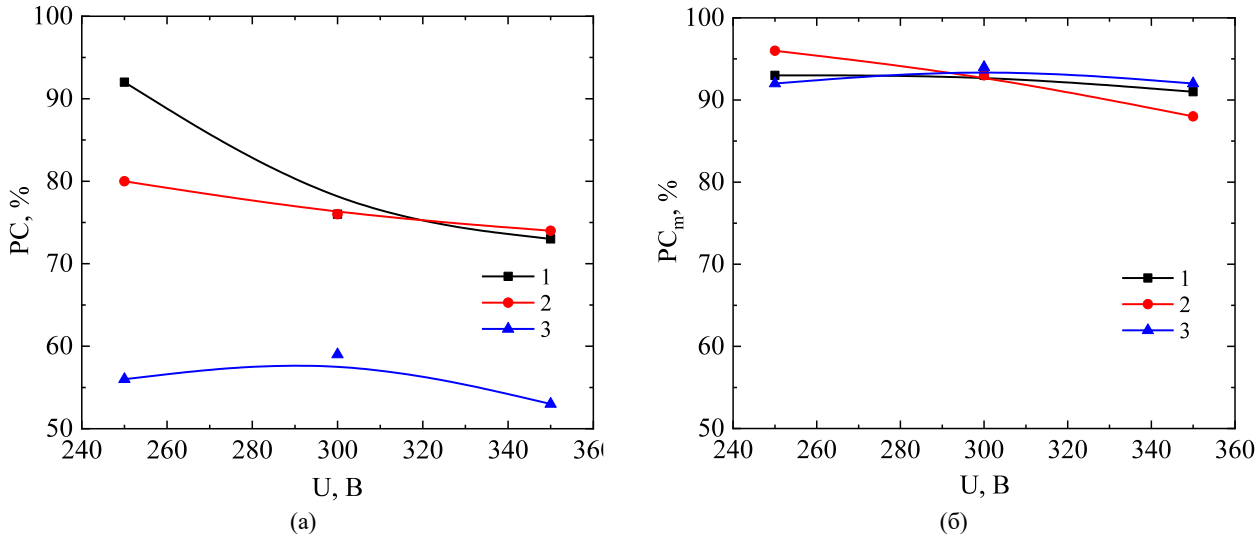


Рис. 8. Расчетные значения рассеивающей способности при различных температурах электролита: *1* – 60; *2* – 80; *3* – 100 °С. Концентрация электролита 6%, вариант расчета по 8 единичным секциям (а) и 6 секциям (б).

значения отличаются не намного больше доверительных интервалов и можно говорить, что зависимости нет или она незначительна.

Вероятно, такое отличие связано с тем, что при 60 °С толщина парогазовой оболочки минимальна и позволяет лучше увидеть разницу между напряжениями обработки. Видно, что при напряжении обработки 250 В в электролите с концентрацией 3% (рис. 5а) значения плотности

тока намного ниже остальных значений напряжения.

В электролите с концентрацией 6% (рис. 5б) при 250 В значения плотностей тока максимальны относительно таковых при более высоких напряжениях обработки. Обратное действие концентрации карбоната натрия на плотность тока наблюдается при напряжениях обработки 250 и 300 В. Причина такого резкого изменения величины на данный момент не ясна и, вероятно, связана с изменением режима проводимости в парогазовой оболочке. Значения же токов при рабочих напряжениях 300 и 350 В схожи между собой и не позволяют сделать вывод о влиянии напряжения на значения плотности тока в этом диапазоне обработки.

Для изучения влияния гидродинамических условий был проведен эксперимент с выключенным перемешиванием электролита (рис. 6). Значимого влияния гидродинамики нет при любой концентрации электролита. Можно предположить, что небольшое изменение средних значений плотности тока связано с локальным нагревом электролита около образца, что вызывает уменьшение тока.

Максимальное значение рассеивающей способности наблюдается при низкой температуре и повышенном напряжении при всех изученных концентрациях электролита рис. 7, 8.

С практической точки зрения стабильность РС при 80 °С является преимуществом ввиду того, что оборудование для ЭПП часто не имеет стабилизированного напряжения и данная стабильность РС улучшит воспроизводимость обработки.

Зависимость РС от напряжения при 6% карбонате противоположна полученной в растворе с концентрацией 3%. При повышенной концентрации электролита обработка при 80 °С демонстрирует стабильное значение РС, то есть РС при любом рабочем напряжении из исследуемого диапазона практически не зависит от напряжения обработки.

ВЫВОДЫ

1. Максимальная рассеивающая способность достигается при низкой температуре (60 °С) и высоком напряжении (350 В).

2. Температура 80 °С является оптимальной с практической точки зрения, обеспечивая стабильность РС в диапазоне напряжений 250–350 В, что критично для работы на оборудовании с нестабилизированным напряжением.

3. Повышение концентрации электролита с 3 до 6% ведет к росту средней плотности тока на всех сегментах анода. При 80 °С в 6% растворе РС практически не зависит от напряжения.

4. Напряжение 250 В в 6% электролите вызывает аномально высокую плотность тока по сравнению с 300 и 350 В, что, вероятно, связано со сменой режима проводимости в парогазовой оболочке.

5. Коэффициент вариации плотности тока, характеризующий нестационарность процесса, достигает 20% и выше в условиях пузырькового кипения при 100 °С, особенно в 6% электролите.

6. Гидродинамические условия (принудительное перемешивание) не оказывают значимого влияния на распределение тока, подтверждая доминирующую роль процессов парообразования.

7. Расчет РС двумя методами (с учетом всех секций и без учета крайних – РСm) подтвердил сильное влияние краевых эффектов в карбонатном электролите на крайних (1- и 8-м) сегментах анода.

С практической точки зрения карбонатный электролит обладает важным технологическим преимуществом – высокой стабильностью рассеивающей способности в диапазоне рабочих напряжений 250–350 В при температуре 80 °С (по сравнению с сульфатным [9]). Это делает его особенно привлекательным для обработки деталей сложной геометрии на оборудовании без жесткой стабилизации напряжения, обеспечивая воспроизводимость результатов и снижая риск локального перетравливания кромок.

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, Proc.

3rd Int. Conf. on Advanced Surface Enhancement (INCASE), 2023. 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. 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

7. 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

8. 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

9. Silkin, S.A., Study of the scattering capacity of sulfate electrolyte for electrolytic plasma polishing, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2025, vol. 61, p. 581. https://doi.org/10.3103/S1068375525700620

10. ГОСТ 9.309-86. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия гальванические. Определение рассеивающей способности электролитов при получении покрытий. Национ. стандарт Российской Федерации, дата введения 1987-01-01. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2005. 8 с.

11. 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

12. Pérez-Durán, H., Martínez-Baltodano, F., and Vargas-Gutiérrez, G., Polishing of AISI 304 SS by electrolytic plasma in aqueous urea solution: Effect on surface modification and corrosion resistance, *Materials*, 2025, vol. 18, no. 16, p. 3786. https://doi.org/10.3390/ma18163786

13. Куликов, И. С., Ващенко, С. В., Каменев, А. Я. *Электролитно-плазменная обработка материалов.* Минск: Беларус. навука, 2010, 232 с. ISBN 978-985-08-1215-5.

Summary

This paper examines the scattering capacity of a carbonate electrolyte during electrolytic plasma polishing (EPP) using a sectional anode. The effects of electrolyte concentrations of 3 and 6%, temperature (60, 80, and 100 °C), operating voltage (250, 300, and 350 V), and hydrodynamic conditions on the current distribution and process stability were experimentally studied. It was shown that a temperature of 80 °C ensures the maximum stability of the scattering capacity, which is important for reproducible machining under unstabilized voltage conditions. The results of this study expand the understanding of EPP mechanisms in carbonate electrolytes and can be used to optimize the machining of complex-geometry parts.

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