Изучение распределения удельного съема материала в отверстиях при электролитно-плазменном полировании нержавеющей стали

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

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

Поступила в редакцию 11.12.2025
После доработки 02.02.2026
Принята к публикации 05.02.2026

Разработана и апробирована методика оценки распределения удельного съема материала в отверстияхпри электролитно-плазменном полировании нержавеющей стали AISI 316. Методика позволяет количественно оценивать краевые эффекты для оптимизации режимов полирования сложнопрофильных деталей. Исследовано влияние глубины погружения (2 и 10 см) и температуры электролита (40–100 °С) на распределение съема материала и рассеивающую способность. Показано различное поведение верхней и нижней кромок отверстий: скорость съема на верхней кромке в среднем выше. Установлено, что рассеивающая способность растет с увеличением глубины погружения, а наиболее равномерная обработка достигается при температуре электролита 80 °С.

Ключевые слова: электролитно-плазменное полирование, краевой эффект, полирование отверстий, рассеивающая способность, распределение съема

УДК 621.7.047.7
https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.1.12

ВВЕДЕНИЕ

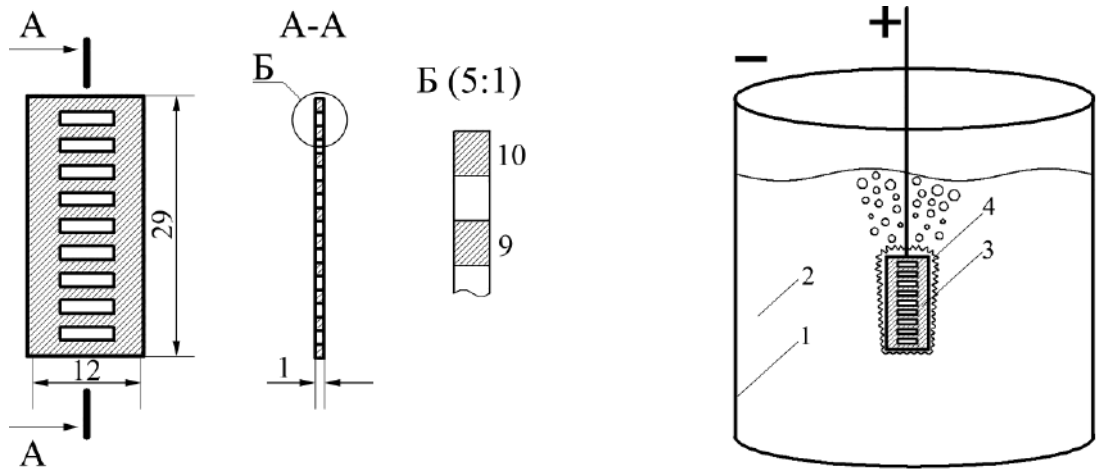
Электролитно-плазменное полирование (ЭПП) используется в качестве высокоэффективного метода финишной обработки сложно-профильных поверхностей, позволяющего добиваться значительного снижения шероховатости и формирования пассивного поверхностного слоя [1–5].

Метод особенно востребован для изделий, полученных с помощью аддитивных технологий, которые часто характеризуются наличием опорных структур, ступенчатостью и повышенной макрорельефностью поверхности [6]. Нержавеющая сталь марки AISI 316 является одним из наиболее распространенных металлических материалов для аддитивных технологий благодаря своему балансу коррозионной стойкости, механических свойств и технологичности печати [7–10].

ЭПП как самостоятельная технология применяется для уменьшения шероховатости поверхности после ее упрочнения другими методами [11, 12] и в качестве одного из методов при комбинированном полировании [13, 14].

Ключевой особенностью ЭПП является образование парогазовой оболочки (ПГО) (в большей степени паровой) вокруг полируемой детали и прохождение тока через нее [15–17]. Точность обработки и итоговое качество поверхности напрямую зависят от пространственного распределения плотности тока в ПГО. Особую проблему представляет так называемый краевой эффект — концентрация силовых линий электрического поля и, как следствие, локальное увеличение плотности тока на острых кромках, вершинах и гранях образца. Это явление приводит к неравномерному стравливанию материала, скруглению кромок, а в критических случаях – к термическому повреждению или стравливанию краевых зон, что недопустимо для точных деталей. В случае электролитно-плазменного полирования отверстий распределение тока усложняется за счет того, что парогазовая оболочка неравномерно распределена по кромкам отверстия и за счет этого может по-разному влиять на скорость обработки в зависимости от геометрического расположения образца и гидродинамических условий.

Большинство исследований опирается на интегральные характеристики (средний ток, напряжение), что не позволяет проанализировать локальные особенности процесса, особенно важные при обработке сложнопрофильных деталей. При использовании ЭПП как способа постобработки деталей важна не сама величина конкретного съема на грани, а равномерность съема, так как сам съем можно заложить при моделировании детали в виде припуска. Поэтому важно знать распределение съема не только по



(а) (б)

Рис. 1. Чертеж образца для изучения распределения тока в отверстиях(а), его сечение (А–А) и увеличенный вид 9- и 10-единичного элемента (Б) и схема обработки (б), где *1* – катод; *2* – электролит; *3* – образец (анод); *4* – парогазовая оболочка.

поверхности образца (коррелирующее с распределением тока), но и на гранях или кромках отверстий.

Изучением распределения тока по поверхности при электрохимической обработке занимаются давно, в частности при оценке рассеивающей способности электролита для гальванического осаждения покрытий широко используется метод, описанный в государственном стандарте с применением ячейки Моллера [18], а также метод вращающегося цилиндрического катода [19] для учета гидродинамических условий. Конечно, условия при ЭПП кардинально отличаются от гальванического осаждения, но методики изучения распределения тока могут быть применимы и к ЭПП с учетом их адаптации.

В работе [20] было изучено распределение тока при электролитно-плазменном полировании с помощью секционного анода, что позволило оценить распределение тока по поверхности плоского образца в зависимости от условий проведения ЭПП.

Цель данного исследования – разработка и экспериментальная апробация методики оценки распределения плотности тока на краях упорядоченных равноудаленных отверстий при их электролитно-плазменном полировании.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

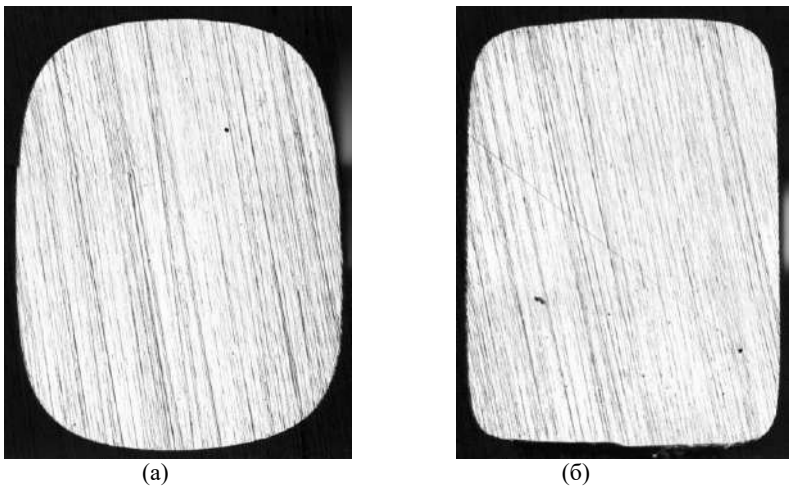
Для оценки распределения тока были изготовлены образцы с равноудаленными отверстиями 6×1,5 мм (рис. 1а). Для изготовления образца применялась нержавеющая сталь AISI316 следующего состава: C– до 0,08%; Si– до 1%; Mn– до 2%; S– до 0,03%; P– до 0,045%; Ni – 10–14%; Cr –16–18%; Mo–2–3%; остальное – Fe.

Процесс ЭПП проводили в течение времени, необходимого для протекания заряда 120 Кл через квадратный сантиметр поверхности (контроль проводился кулонометром) в 3% водном растворе сульфата аммония при рабочем напряжении 300 В. Образец, подключенный к положительному полюсу источника питания, погружали в электролит до уровня, обеспечивающего его заглубление в 2 см. Межэлектродное расстояние составляло 50мм. Эксперименты выполняли при температуре электролита 40, 60, 80, 100 °С с предельным отклонением от заданной температуры 2 °С в условиях слабого перемешивания магнитной мешалкой.

После обработки изготавливался шлиф образца в сечении А–А (рис. 1а) и проводилось измерение размеров единичного элемента. Единичный элемент до обработки имел прямоугольную форму (рис. 1а), а за счет того, что при обработке происходит скругление кромок, форма стремится к овальной (рис. 2).

Дальнейшая обработка микрофотографий проходила путем выделения контуров единичного элемента после обработки и совмещения с таковыми до обработки для нахождения площади удаленного материала (рис. 3).

Учитывая невозможность измерения реально удаленного объема материала на каждом элементе ввиду нелинейности удаления на кромках отверстия, было решено использовать безразмерную величину среднего относительного удаления материала (величина съема на кромке единичного элемента, деленная на среднее значение съема по всем единичным элементам, включая нижнюю и верхнюю кромки), обозначаемую на рисунках как относительный съем.



(а) (б)

Рис. 2. Микрофотография единичного элемента на шлифе: первого, наиболее глубоко погруженного (а); пятого (б).

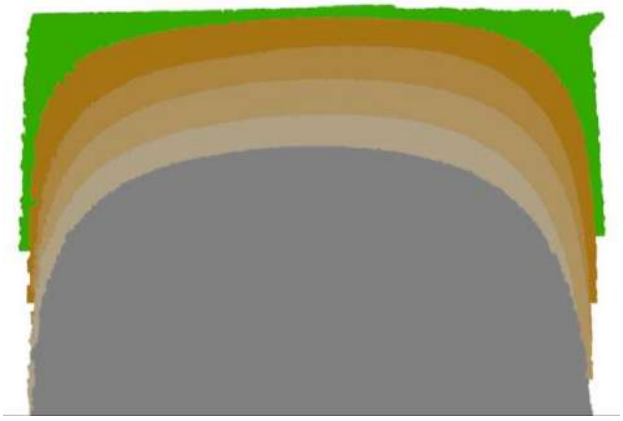


Рис. 3. Фотография, составленная наложением форм единичных элементов на исходную поверхность для расчета площади удаленного материала (слои специально смещены для демонстрации эффекта скругления кромок).

Расчет рассеивающей способности выполняли по методу, аналогичному ГОСТ 9.309-86 [18] для гальванических покрытий, где вместо толщины покрытия было использовано значение среднего относительного съема материала на верхней или нижней кромках единичного элемента

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

$$b_n = \frac{b}{b_{ср}}, \quad (2)$$

где 6,37 – коэффициент, отвечающий за первичное распределение съема в ячейке для 10-секционного катода (в данной работе были использованы значения для 10- и 8-секционного анода); b_n – распределение съема, рассчитываемое как отношение съема на конкретной кромке единичного элемента b к среднему значению на всех кромках единичных элементов образца $b_{ср}$.

Экспериментальное распределение тока в ячейке для полирования отличается от распределения в ячейке Молера [18], на основе которой рассчитан коэффициент 6,37. Таким образом, абсолютное значение рассеивающей способности, полученное с его использованием, является оценочным. Однако для данной работы ключевое значение имеет не абсолютная величина, а ее относительное изменение в серии экспериментов. Использование указанного коэффициента позволяет сохранить единообразие расчетной формулы и корректно отслеживать динамику процесса.

Расчет рассеивающей способности проводился как с учетом в расчетах всех 10 единичных элементов (PC), так и без учета значений крайних элементов (PCm). Необходимость удаления для расчетов первого и последнего элемента связана с заметным отличием парогазовой оболочки на нижней и верхней частях образца [17] и соответствующим распределением тока, показанного в [20], а также тем, что если принять особые допуски для нижней и верхней частей образца и изготовить деталь с их учетом, остается необходимость оценить равномерность распределения по остальной части поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Так как за счет архимедовой силы характер парогазовой оболочки на нижней и верхней

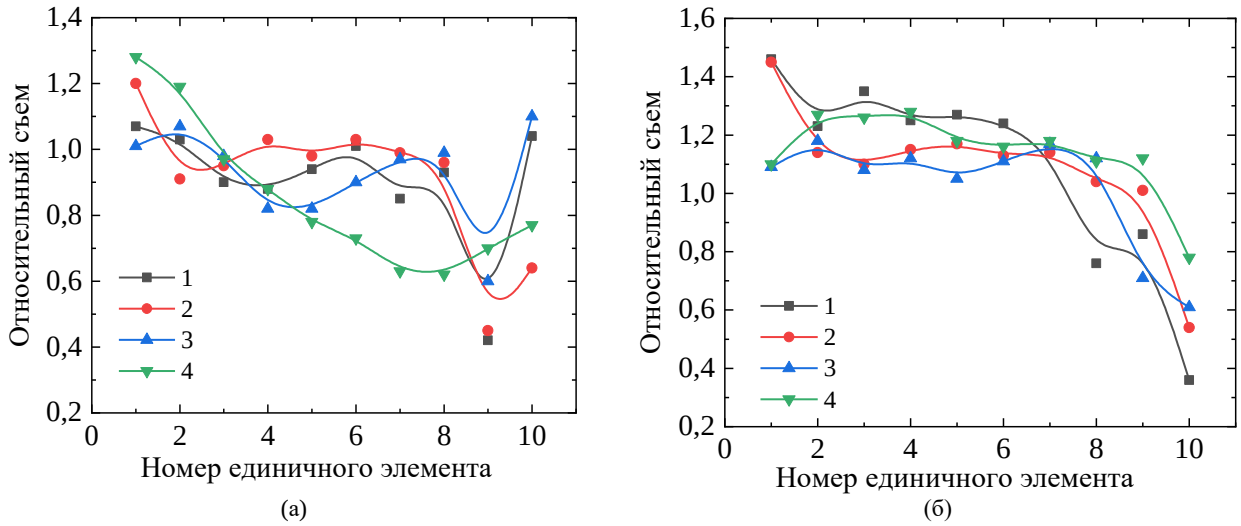


Рис. 4. Относительный съем материала на единичном элементе в зависимости от глубины погружения (номера единичного элемента) на нижней (а) и верхней (б) кромках единичного элемента при температуре электролита: *1* – 40; *2* – 60; *3* – 80; *4* – 100 °С.

кромках единичного элемента будет разный, было решено изучать отдельно верхнюю и нижнюю кромки. Из представленных на рис. 4 данных можно заметить, что относительный съем металла на нижней кромке (рис. 4а) в среднем по всему образцу ниже, чем на верхней кромке (рис. 4б), что, вероятно, связано с условиями формирования парогазовой оболочки и влиянием архимедовой силы, выталкивающей и стабилизирующей оболочку на нижней кромке. На верхней кромке, возможно, за счет более интенсивных колебаний оболочки из-за вытеснения ее электролитом скорость съема материала повышается.

Если рассматривать динамику относительного съема на нижней кромке при увеличении глубины погружения (первый единичный элемент максимально заглублен), то можно сделать вывод, что в этом случае равномерное снижение относительного съема наблюдается только при температуре кипения электролита, то есть при максимальной толщине парогазовой оболочки и то только до восьмого единичного элемента, после которого идет незначительное повышение относительного съема. В остальных случаях, включая и верхнюю кромку, прямого падения относительного съема с увеличением заглубления не наблюдается.

В работе [20] на примере плоского образца было показано, что токи крайних сегментов анода обычно больше серединных сегментов, что не совпадает с данными, полученными для отверстий. Очевидно, что значения относительного съема на самом верхнем (мало погруженном) десятом единичном элементе сильно отличаются от девятого единичного элемента, причем если на нижней кромке значение съема близко к среднему по образцу, то на верхней кромке является минимальным. Минимальное значение съема на верхней кромке десятого единичного элемента можно объяснить тем, что весь выделяющийся пар, поднимаясь наверх, собирается у этой кромки единичного элемента, за счет чего она значительно толще, а следовательно, ток меньше.

Видно, что в средней части образца, кромки единичных элементов со второго по восьмой, в основном растворяются с похожими скоростями в пределах одного образца и схожими в пределах разных температур, что совпадает с данными, полученными для плоского образца [20], и свидетельствует о том, что значимого изменения скорости съема в средней части образца не происходит (за исключением температуры кипения на нижней кромке образца и восьмого элемента при 40 °С на верхней кромке).

Малое значение съема на нижней кромке девятого элемента объясняется расширением оболочки вследствие экранирования паром других отверстий, из-за чего локально наблюдаются утолщение оболочки, снижение тока растворения, и это понижение не зависит от температуры электролита.

Для понимания влияния глубины погружения на распределение относительного съема проведено сравнение образца с заглублением нижней части на 10 см от уровня электролита и образцом, заглубленным на 2 см.

Уровень заглубления неоднозначно влияет на распределение относительного съема (рис. 5). Если рассматривать верхнюю кромку единичного элемента (рис. 5а), то можно сделать вывод, что величина съема с увеличением глубины в среднем увеличилась и резкого падения съема на девятом элементе не наблюдается. В случае нижней кромки на первых единичных элементах скорость съема на

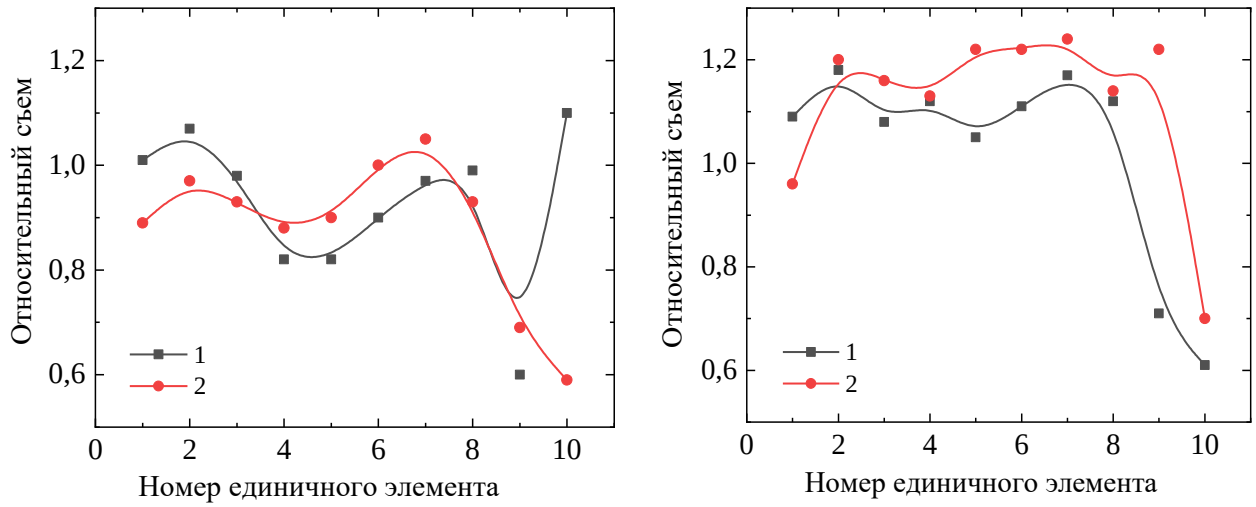


Рис. 5. Относительный съем материала на единичном элементе в зависимости от глубины погружения (номера единичного элемента) на нижней (а) и верхней (б) кромках единичного элемента и заглубления образца на 1–2 и 2–10 см.

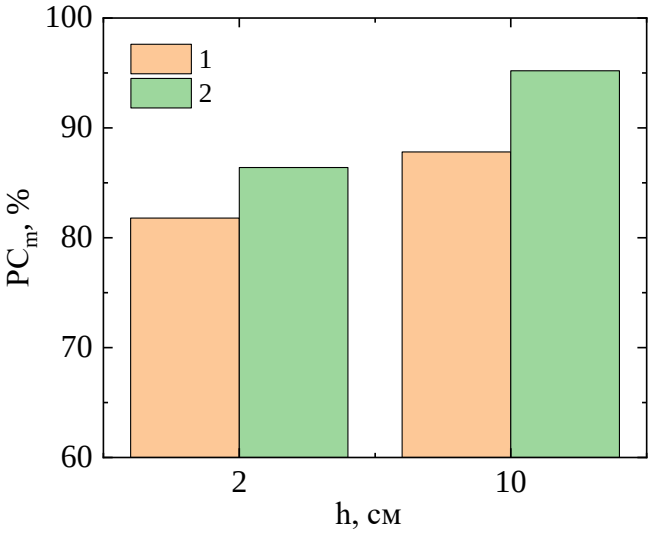


Рис. 6. Рассеивающая способность электролита в зависимости от уровня заглубления образца на нижней (*1*) и верхней (*2*) кромках единичного элемента (80 °С).

Таблица. Расчетные значения рассеивающей способности электролита в зависимости от его температуры

	40 °С		60 °С		80 °С		100 °С	
Кромка	PC	PCm	PC	PCm	PC	PCm	PC	PCm
нижняя	80,3	79,2	74,4	79,8	82,9	81,8	66,7	70,7
верхняя	62,7	77,4	79,9	93,3	77,8	86,4	87,4	92,2

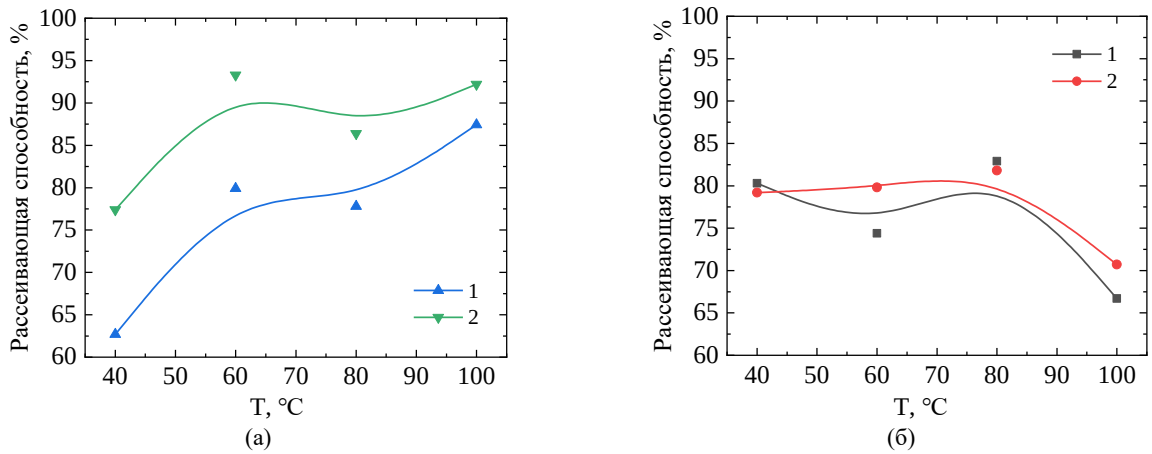


Рис. 7. Влияние температуры электролита на его рассеивающую способность на нижней (а) и верхней (б) кромках единичного элемента в варианте расчета: *1* – PC; *2* – PCm.

большей глубине погружения меньше, но на других единичных элементах она оказывается соизмерима или больше, чем на меньшей глубине (за исключением десятого элемента). Поведение нижней кромки десятого элемента при большем заглублении образца отличается от его поведения при меньшем заглублении. Вероятно, это связано с небольшим влиянием гидростатического давления, уменьшающего колебания кромки и смещающего самую толстую часть парогазовой оболочки дальше (за пределы образца), что и не вызывает роста съема, как на рис. 4, при любой температуре.

Расчет рассеивающей способности электролита позволяет более полно охарактеризовать распределение съема при изучении влияния как заглубления (рис. 6), так и температуры электролита (рис. 7, таблица). Хотя при увеличении заглубления рассеивающая способность повышается, но растет и разница между ее значениями на верхней и нижней кромках, что может вызвать технологические проблемы при обработке деталей большого размера.

Заглубление образца прямо влияет на распределение съема на нем (рис. 6). При повышении глубины образца рассеивающая способность повышается на любой из кромок, вероятно, это связано с более равномерным распределением тока ввиду улучшения геометрического соответствия между катодом и анодом в ванне, а также из-за повышения гидростатического давления, поджимающего и стабилизирующего парогазовую оболочку.

При рассмотрении изменения рассеивающей способности (рис. 7) на нижней кромке единичного элемента при увеличении температуры видно ее повышение, причем как в расчете по десяти, так и по восьми единичным элементам. Такое увеличение связано с повышением средней толщины оболочки и противоположно описанному для плоского образца [20], что доказывает отличия процессов, происходящих на кромках. На верхней кромке рассеивающая способность незначительно изменяется в диапазоне температур электролита 40–80 °С, но сильно снижается при повышении температуры до 100 °С, что говорит о нестабильности оболочки на некоторых единичных элементах ввиду ее большой толщины.

На основании анализа отличий в величинах PC и PCm, рассчитанных для верхней и нижней кромок, можно сделать вывод о том, что разница между этими вариантами расчета максимальна только на нижней кромке, что говорит о большем влиянии краевых эффектов на нижней кромке, чем на верхней. Учитывая такое влияние, при обработке реальных деталей нужно стремиться к тому, чтобы скорость съема на верхней и нижней кромках отличались незначительно, а для этого можно как вращать деталь, так и использовать для обработки температуру 80 °С, при которой наблюдается наименьшая разница в скорости съема на кромках.

ВЫВОДЫ

- Разработана и апробирована методика оценки удельного распределения съема при электролитно-плазменном полировании на кромках упорядоченных равноудаленных отверстий.
- Показано, что распределение и скорость съема материала различаются на верхней (больше) и нижней кромках отверстий из-за разной динамики парогазовой оболочки.
- Рассеивающая способность электролита возрастает с увеличением глубины погружения образца, а ее зависимость от температуры различна для верхней и нижней кромок.
- Максимальная рассеивающая способность, рассчитанная для нижней кромки единичного элемента, наблюдается при обработке в электролите при 100 ºС и составляет 87,4%, а для нижней кромки – 82,9% при 80 ºС.
- Максимальная рассеивающая способность без учета крайних элементов PCm, рассчитанная для нижней кромки единичного элемента, наблюдается при обработке в электролите при 60 ºС и составляет 93,3%, а для нижней кромки– 81,8% при 80 ºС.
- Краевые эффекты сильнее влияют на распределение съема на нижней кромке.
- Наиболее равномерная обработка кромок достигается при температуре электролита 80 °С.
- Методика позволяет оптимизировать режимы ЭПП для обработки реальных деталей с отверстиями.

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. 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, art. ID 3786. https://doi.org/10.3390/ma18163786

2. 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: *Proc. 3rdInt. Conf. 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

3. Liu, X., Li, X. and Zhang, J., Parameters optimization of electrolytic plasma polishing of austenitic stainless steel and surface performance analysis, *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C: J. Mech. Eng. Sci*., 2023, vol. 238, no. 9, p. 3807. https://doi.org/10.1177/09544062231202584

4. 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

5. 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

6. 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

7. Zhu, H., Rennie, A., Li, R. and Tian, Y., Two-steps electrochemical polishing of laser powder bed fusion 316l stainless steel, *Surf. Interf.*, 2022, vol. 35, art. ID 102442. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102442

8. Ji, G., Ma, L., Zhang, S., Zhang, J., et al., Study of electrochemical behavior and a material removal mechanism during electrolytic plasma polishing of 316L stainless steel, *Materials*, 2025, vol. 18, no. 6, art. ID 1307. https://doi.org/10.3390/ma18061307

9. Beamud-González, E.M., Núñez-López, P.J. and García-Plaza, E., Electropolishing stainless steel optimization using surface quality, dimensional accuracy, and electrical consumption criteria, *Materials*, 2023, vol. 16, no. 5, art. ID 1770. https://doi.org/10.3390/ma16051770

10. Ghezri, A., Pratama, K., Scholl, Y., Küenzi, A., et al., Energy efficient jet polishing via electrolytic plasma enhances corrosion resistance in stainless steel, *J. Manuf. Mater. Process*., 2024, vol. 8, no. 6, art. ID 289. https://doi.org/10.3390/jmmp8060289

11. 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

12. 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

13. Zatkalíková, V., Podhorský, Š., Štrbák, M., Liptáková, T., et al., Plasma electrolytic polishing-An ecological way for increased corrosion resistance in austenitic stainless steels, *Materials*, 2022, vol. 15, no. 12, art. ID 4223. https://doi.org/10.3390/ma15124223

14. Łyczkowska-Widłak, E., Lochyński, P. and Nawrat, G., Electrochemical polishing of austenitic stainless steels, *Materials*, 2020, vol. 13, no. 11, art. ID 2557. https://doi.org/10.3390/ma13112557

15. 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

16. 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

17. 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

18. 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. М.: ИПК Издательство стандартов, 2005. 8 с.

19. 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

20. 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

Summary

A methodology for assessing the current density distribution at the edges of holes during electrolytic plasma polishing of AISI 316 stainless steel has been developed and tested. That methodology enables the quantitative evaluation of edge effects to optimize polishing modes for complex-shaped parts. The influence of the immersion depth (2 and 10 cm) and electrolyte temperature (40–100 °C) on the material removal distribution and scattering capacity was studied. Different behavior was demonstrated for the upper and lower edges of the holes: the removal rate at the upper edge was, on average, higher. It was found that scattering capacity increased with increasing the immersion depth, and the most uniform finish was achieved at an electrolyte temperature of 80 °C.

Keywords: electrolytic-plasma polishing, edge effect, hole polishing, scattering capacity, current distribution