



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.9.047.7

А.Ю. КОРОЛЁВ, канд. техн. наук, доц.

заведующий научно-исследовательским сектором перспективных технологий¹

E-mail: korolyov@park.bntu.by

В.А. ТОМИЛО, д-р техн. наук, проф.

заведующий кафедрой «Машины и технология обработки металлов давлением»²

E-mail: stamila@rambler.ru

В.С. НИСС, канд. техн. наук, доц.

заведующий инновационно-производственным центром медицинского оборудования и изделий³

E-mail: niss@park.bntu.by

¹Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

³Филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт», г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 16.05.2025.

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ В УПРАВЛЯЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМАХ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Для повышения эффективности методов электролитно-плазменной обработки разработаны режимы, основанные на использовании управляемых импульсов. Режимы реализуются за счет чередования импульсов высокого напряжения, соответствующего электролитно-плазменной области, и бестоковых пауз между ними. В начальный момент включения импульса высокого напряжения действует электрохимический процесс (в стадии формирования парогазовой оболочки). Повышение эффективности импульсного процесса достигается за счет интенсивного съема металла при протекании электрохимического процесса и оптимизации продолжительности электролитно-плазменного процесса, при котором обеспечивается высокое качество поверхности. По результатам исследований установлено, что разработанный импульсный метод за счет совмещения преимуществ как электролитно-плазменного, так и электрохимического процессов обеспечивает формирование поверхности с более гладким и пологим профилем микронеровностей по сравнению с традиционной электролитно-плазменной обработкой на постоянном токе. Наличие электрохимической составляющей приводит к преимущественному растворению высоких выступов и интенсивному сглаживанию неровностей, что способствует снижению угла наклона профиля и уменьшению количества выступов на единицу длины (параметр HSC). Акцентированное растворение выступов в импульсном процессе, по сравнению с обработкой на постоянном токе, подтверждается динамикой изменения параметра Rsk, определяющего асимметричность профиля (преобладание выступов или впадин) — для импульсного режима параметр Rsk выше, что свидетельствует о более интенсивном сглаживании выступов.

Ключевые слова: электролитно-плазменная обработка, импульсы, парогазовая оболочка, анодный процесс, плотность тока, параметры шероховатости

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-3-72-46-53>

Введение. В качестве альтернативы электрохимическим методам повышения качества поверхности изделий из металлических материалов в промышленности широко применяется электролитно-плазменная обработка (ЭПО), основным преимуществом которой является использование электролитов на основе водных растворов солей. Одной из наиболее перспективных областей применения метода является производство изделий медицинского назначения [1]. На основе ЭПО разработан и внедрен в производство ряд новых высокоэффективных процессов, обеспечивающих повышение качества поверхности изделий, изготавливаемых из широкого перечня материалов, включая коррозионностойкие стали, титан и титановые сплавы, кобальтхромовые сплавы и нитинол [2–10]. Традиционно методы ЭПО реализуются в стационарных режимах с использованием постоянного тока (при напряжении около 300 В). Преимуществом стационарных режимов является возможность применения доступных и простых по конструкции источников технологического тока [11]. Кроме того, методы ЭПО на постоянном токе хорошо изучены, на основании их исследований разработана теоретическая база, а результаты обработки, как правило, прогнозируемы и поддаются обоснованию и моделированию. При этом основным недостатком ЭПО является большая энергоемкость, связанная, прежде всего, с высоким напряжением, которое требуется для поддержания стабильной парогазовой оболочки.

Для повышения эффективности методов ЭПО разработаны режимы, основанные на использовании управляемых импульсов (ИЭПО) [12]. Режимы реализуются за счет чередования импульсов высокого напряжения, соответствующего электролитно-плазменной области, и бестоковых пауз между ними. В начальный момент включения импульса высокого напряжения действует электрохимический процесс (в стадии формирования парогазовой оболочки). Повышение эффективности процесса ИЭПО, по сравнению с обработкой на постоянном токе (ПТ), достигается за счет интенсивного съема металла при протекании электрохимического процесса и оптимизации продолжительности электролитно-плазменного процесса, при котором обеспечивается высокое качество поверхности. Поскольку в процессе ИЭПО съем металла осуществляется за счет комплексного электрохимического и электролитно-плазменного воздействия, то механизм формирования профиля поверхности будет существенным образом отличаться от механизма, характерного для обработки на постоянном токе. Таким образом результаты исследований закономерностей формирования профиля поверхности в управляемых режимах ИЭПО представляют большой интерес как в научном, так и практическом плане.

Материалы и методы исследований. Для выполнения исследований использовались плоские

образцы размером 25×5×1 мм из стали AISI 304. Образцы предварительно шлифовались абразивным материалом на войлочной основе (Scotch-Brite) с зернистостью P320–400. Среднее значение шероховатости исходных образцов составило $Ra = 0,212$ мкм.

Для установления закономерностей формирования профиля поверхности выполнялась обработка образцов продолжительностью до 10 мин (0,5, 1, 2, 3, 5, 7,5, 10 мин) в импульсном режиме с длительностью импульсов высокого напряжения 5 мс при амплитуде 300 В и длительностью пауз между импульсами 50 мкс, а также на постоянном токе при напряжении 300 В. Образцы обрабатывались в водном растворе сульфата аммония концентрацией 4 % при температуре 90 °С.

Масса образцов до и после обработки измерялась на аналитических весах OHAUS Pioneer PA 214C с дискретностью 0,1 мг. Съем металла Δm рассчитывался по формуле:

$$\Delta m = \frac{m_{\text{исх}} - m_{\text{кон}}}{m_{\text{исх}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $m_{\text{исх}}$ — масса образца до обработки; $m_{\text{кон}}$ — масса образца после обработки.

Профилограммы поверхности образцов снимались на профилометре MarSurf PS1 при базовой длине $L_t = 5,6$ мм (отсечка шага $\lambda_c = 0,8$ мм; общая длина измерения — 4 мм). Для дальнейшей оценки выбирались профилограммы, на которых параметр Ra имел минимальное отклонение от установленного среднего значения в серии измерений. Для обработки профилограмм и расчета параметров шероховатости использовалось программное обеспечение MarWin. Оценка состояния поверхности выполнялась по следующим параметрам: среднеарифметическое отклонение профиля Ra , средняя высота выступов Rp , средняя глубина впадин Rv , средний шаг неровностей профиля Sm , среднеквадратический наклон профиля Δq (согласно ГОСТ 25142-82), асимметричность Rsk и эксцесс (островершинность) Rku профиля (согласно ГОСТ Р ИСО 4287-2014) и HSC — количество элементов профиля на 1 см длины, которые находятся выше линии, эквидистантно расположенной на заданном расстоянии от средней линии профиля (согласно ASME B46.1-2019).

Результаты исследований и их обсуждение. Зависимости съема металла от продолжительности обработки имеют линейный характер (рисунок 1 а). Для исследуемого импульсного режима по сравнению с режимом, основанным на применении постоянного тока (ПТ), характер динамики изменения шероховатости в процессе обработки значительно отличается (см. рисунок 1 б). Так, в импульсном режиме наиболее существенное изменение шероховатости отмечается при обработке с продолжительностью до 3 мин. С дальнейшим увеличением продолжительности обработки па-

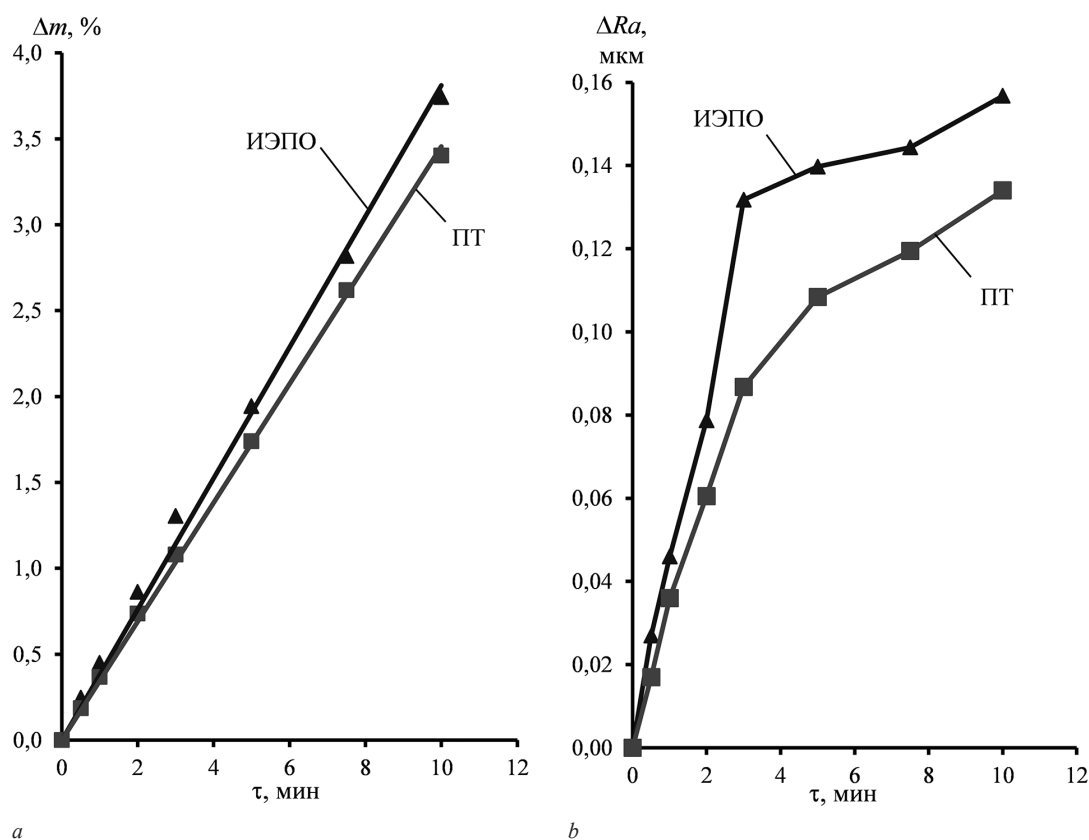


Рисунок 1 — Влияние продолжительности обработки на изменение съема металла (a) и шероховатости (b)
Figure 1 — Effect of treatment duration on changes in metal removal (a) and roughness (b)

параметр Ra изменяется незначительно. На постоянном токе с увеличением продолжительности обработки происходит более плавное изменение шероховатости. В результате обработка в импульсном режиме с продолжительностью 3 мин обеспечивает величину изменения шероховатости ($\Delta Ra = 0,132$ мкм), сопоставимую с ΔRa при обработке на постоянном токе с продолжительностью 10 мин ($\Delta Ra = 0,134$ мкм).

Сравнение данных о съеме металла и динамике изменения параметра шероховатости Ra в импульсном режиме с аналогичными данными, полученными в результате обработки на постоянном токе (см. рисунки 1 a, b), указывает на принципиальные отличия в механизмах формирования микрогеометрии поверхности при реализации рассматриваемых методов. Например, для импульсного режима показатель $\Delta m / \Delta Ra$, характеризующий количество металла, которое необходимо удалить с поверхности для снижения шероховатости на единицу, на начальном этапе обработки (до 3 мин) ниже на 30–43 % по сравнению с традиционной ЭПО на постоянном токе. Причем разница в изменении массы не такая значительная — превышение съема в импульсном режиме составляет в среднем 10,1 %. Таким образом, очевидно, что наличие электрохимической составляющей в импульсном процессе обеспечивает более благоприятные условия для сглаживания микропрофиля поверхности.

В работе [13] установлено, что в процессе ЭПО, выполняемом на постоянном токе, формирование результирующей поверхности происходит вследствие равновероятного сглаживания систематических и случайных неровностей. За счет динамической устойчивости парогазовой оболочки со средней толщиной, соизмеримой с высотой профиля поверхности, пробой в ней может происходить с равной вероятностью как на выступах, так и во впадинах профиля обрабатываемой поверхности в области случайных неоднородностей электрического поля. В отличие от ЭПО, в электрохимическом процессе происходит преимущественное растворение высоких микронеровностей с минимальным радиусом кривизны вершин и большим углом наклона профиля. При этом прежде всего сглаживаются периодические неровности, более идентичные по высоте и конфигурации. Микропрофиль изменяется в направлении преобразования его неровностей в более пологий вид с округленными выступами [14]. Таким образом, за счет совмещения в процессе ИЭПО преимуществ как электролитно-плазменного, так и электрохимического процессов обеспечивается формирование поверхности с более гладким и пологим профилем микронеровностей. При этом электрохимическая составляющая приводит к доминирующему сглаживанию наиболее высоких и острых выступов, в то время как электролитно-плазменный процесс обеспечивает эф-

фективное сглаживание остальных неровностей. Поэтому для установления механизма формирования микрогеометрии в процессе ИЭПО необходимо оценить динамику изменения высотных и шаговых параметров шероховатости поверхности, характеризующих формируемый микропрофиль, а также выполнить сравнительный анализ результатов с аналогичными данными, полученными для постоянного тока.

Примеры полученных профилограмм для исходного образца, а также для образцов, обработанных в импульсном режиме и на постоянном токе продолжительностью 1, 3, 5 и 10 мин, представлены в таблице 1. Профили формируемой поверхности для импульсного режима и для постоянного тока имеют существенные отличия. При равной продолжительности обработки в импульсном режиме формируется профиль с меньшими значениями высотных параметров, а пики профиля имеют больший радиус закругления. Причем наи-

более отчетливо такие особенности проявляются на профилограммах образцов, обработанных с продолжительностью до 3 мин, когда, согласно полученным экспериментальным данным (см. рисунок 1 б), происходит наиболее интенсивное снижение шероховатости.

Рассчитанные по результатам обработки профилограмм значения параметров Ra , Rp , Rv , Sm и Rku исследуемых образцов представлены в таблице 2. Средняя глубина впадин профиля Rv , формируемого в импульсном режиме, меньше, чем при обработке на постоянном токе во всем диапазоне продолжительности обработки. Средняя высота выступов Rp при продолжительности до 2 мин имеет близкие значения, после чего интенсивность снижения параметра Rp для импульсного режима увеличивается. Такое изменение параметров Rv и Rp свидетельствует о более акцентированном растворении выступов в процессе ИЭПО по сравнению с обработкой на постоянном

Таблица 1 — Участки профилограмм поверхности исследуемых образцов
Table 1 — Sections of surface profilograms of the studied samples

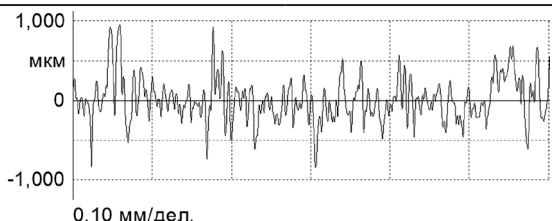
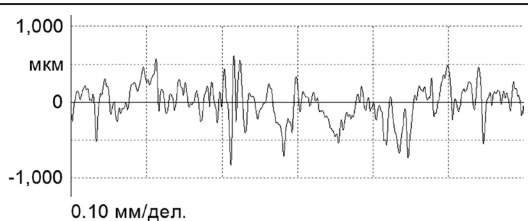
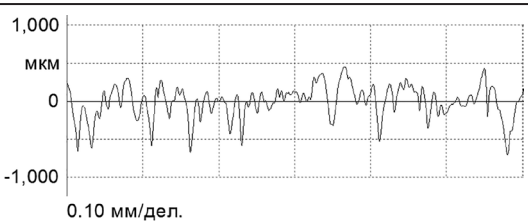
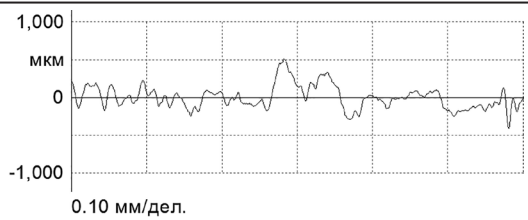
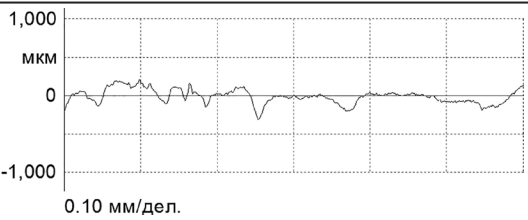
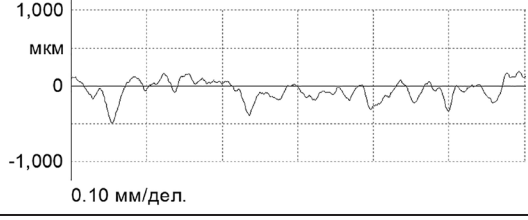
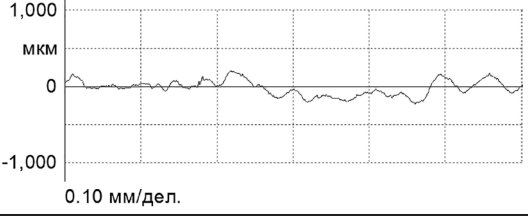
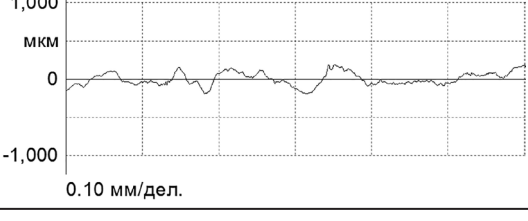
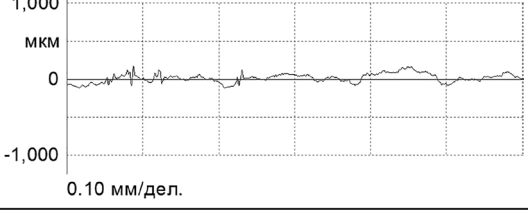
Исходное состояние		
τ , мин	ПТ	ИЭПО
1		
3		
5		
10		

Таблица 2 — Значения параметров шероховатости исследованных образцов
Table 2 — Values of roughness parameters of the studied samples

Параметры	τ , мин	Ra , мкм	Rp , мкм	Rv , мкм	Sm , мкм	Rku
Исходное состояние	0	0,210	0,784	1,345	19,8	7,597
ПТ	1	0,176	0,671	0,969	21,9	6,744
	2	0,146	0,443	0,869	26,6	5,706
	3	0,133	0,383	0,567	47,8	5,889
	5	0,109	0,309	0,457	45,8	3,305
	7,5	0,092	0,283	0,332	59,9	3,314
	10	0,079	0,230	0,248	58,6	2,954
ИЭПО	1	0,172	0,727	0,840	30,9	4,564
	2	0,134	0,450	0,717	50,2	4,309
	3	0,081	0,214	0,293	57,4	3,288
	5	0,071	0,230	0,250	65,0	3,250
	7,5	0,063	0,196	0,209	69,7	3,022
	10	0,052	0,173	0,145	76,3	2,915

токе. В результате преимущественного растворения выступов средняя линия, положение которой определяется условием минимального среднеквадратичного отклонения профиля от нее, смещается вглубь профиля, что приводит к снижению преобладания выступов над впадинами. Такая закономерность характерна и для постоянного тока, однако в импульсном режиме за счет доминирующего растворения наиболее высоких неровностей она проявляется сильнее. Подтверждением этому являются зависимости параметра Rsk , определяющего асимметричность профиля (преобладание выступов или впадин), от продолжительности обработки (рисунок 2 а). С увеличением продолжительности обработки значение параметра Rsk увеличивается как в импульсном режиме, так и при обработке на постоянном токе. При этом для импульсного режима параметр Rsk выше, что свидетельствует о более интенсивном сглаживании выступов. После обработки в импульсном режиме с продолжительностью 10 мин параметр Rsk принимает положительные значения, соответственно в таком профиле преобладают впадины. В результате обработки продолжительностью 10 мин значение среднего шага микронеровностей Sm увеличивается с 19,8 мкм (для исходного образца): до 58,6 мкм — для постоянного тока, до 76,3 мкм — для импульсного режима.

Особенности формирования профиля в процессе ИЭПО также демонстрируются динамикой изменения эксцесса Rku — параметра, характеризующего остроту кривой плотности распределения выступов и впадин. Его высокое значение для исходного образца ($Rku = 7,597$) указывает на наличие выраженных узких вершин и впадин

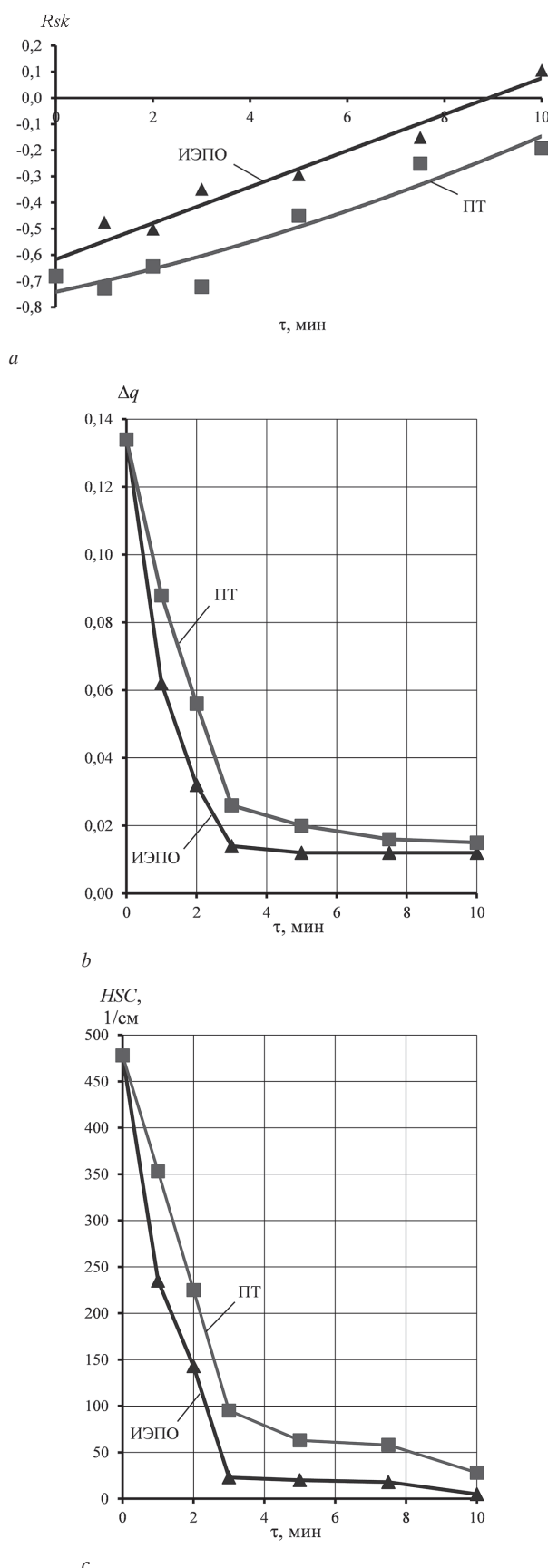


Рисунок 2 — Динамика изменения параметров шероховатости поверхности при обработке в импульсном режиме и на постоянном токе: а — Rsk ; б — Δq ; в — HSC
Figure 2 — Dynamics of changes in surface roughness parameters during processing in pulse mode and with direct current: а — Rsk ; б — Δq ; в — HSC

с острыми пиками. В результате обработки как в импульсном режиме, так и на постоянном токе параметр стремится к значению $Rku = 3$, что указывает на более случайное распределение значений высот элементов профиля поверхности [15]. При этом в условиях ИЭПО значение параметра Rku снижается более интенсивно по сравнению с обработкой на постоянном токе.

На рисунках 2 б и с представлены зависимости, характеризующие динамику изменения среднеквадратического наклона профиля Δq и параметра HSC на расстоянии 0,2 мкм от средней линии профиля. Как и в случаях с ранее рассмотренными параметрами шероховатости, в импульсном режиме в первые минуты обработки происходит более интенсивное снижение параметров Δq и HSC . Причем необходимо обратить внимание на то, что при сопоставимых значениях параметра Ra после обработки с продолжительностью 1 мин (0,176 мкм и 0,172 мкм, соответственно, для постоянного тока и импульсного режима) значения параметров Δq и HSC имеют существенную разницу. Так, значение параметра Δq снижается с 0,134 для исходного образца до 0,088 для постоянного тока и 0,062 — для импульсного режима. Значения параметра HSC при этом составляют 353 и 235 1/см соответственно. Это указывает на доминирующее сглаживание наиболее высоких и острых выступов именно на начальной стадии обработки.

На основании анализа полученных профилограмм (см. таблицу 1) и динамики параметров шероховатости формируемой поверхности, предложена схема, демонстрирующая закономерности формирования профиля в управляемых импульсных режимах (рисунок 3). Штриховой линией на схеме показан участок профиля с вертикальным увеличением $\times 50\,000$ и горизонтальным увеличением $\times 5000$, полученный из профилограммы исходного образца. На исходном профиле имеются две основные неровности в виде высокого выступа и глубокой впадины, а также несколько относительно небольших выступов и впадин. Сплошной тонкой линией показан профиль поверхности, формируемый в результате ЭПО на

постоянном токе. Съем металла как с основного выступа, так и с небольших выступов происходит с равной интенсивностью. При этом во впадинах съем металла ниже, чем на выступах. В импульсном режиме (сплошная тонкая линия) за счет наличия электрохимической составляющей происходит преимущественное растворение основного выступа, а съем металла на небольших выступах и во впадинах при этом уменьшается. В результате расстояние между вершиной основного выступа профиля и нижней точкой прилегающей к нему впадины становится меньше, чем при обработке на постоянном токе ($Z_{\text{иэпо}} < Z_{\text{пт}}$). Аналогичный эффект наблюдается в основной впадине профиля. Прилегающий к ней выступ в импульсном режиме растворяется более интенсивно, а на дне впадины интенсивность съема, наоборот, снижается. В итоге между нижней точкой впадины и вершиной прилегающего к нему выступа профиля обеспечивается меньшее расстояние ($Z_{\text{иэпо}} < Z_{\text{пт}}$). Преимущественное растворение высоких выступов приводит к более интенсивному сглаживанию профиля по сравнению с обработкой на постоянном токе, что обеспечивает снижение угла наклона профиля, характеризуемого параметром Δq , и уменьшение количества выступов на единицу длины (параметр HSC).

Заключение. При выполнении электролитно-плазменной обработки в управляемых импульсных режимах механизм формирования микрогеометрии поверхности имеет принципиальные отличия от механизма, характерного для традиционной обработки с использованием постоянного тока. Для импульсного режима показатель $\Delta m/\Delta Ra$, характеризующий количество металла, которое необходимо удалить с поверхности для снижения шероховатости на единицу, на начальном этапе обработки (до 3 мин) ниже на 30–43 % по сравнению с традиционной ЭПО на постоянном токе. При этом разница в изменении массы является значительно меньшей — превышение съема в импульсном режиме составляет в среднем 10,1 %. По результатам анализа профилограмм и оценки динамики изменения параметров шероховатости Ra , Rp , Rv , Sm , Δq , Rsk , Rku и HSC установлено, что за счет совмещения преимуществ как электролитно-плазменного, так и электрохимического процессов в импульсном режиме обеспечивается формирование поверхности с более гладким и пологим профилем микронеровностей по сравнению с ЭПО на постоянном токе. Наличие электрохимической составляющей приводит к преимущественному растворению высоких выступов и интенсивному сглаживанию неровностей, что способствует снижению угла наклона профиля, характеризуемого параметром Δq , и уменьшению количества выступов на единицу длины (параметр HSC). Акцентированное растворение выступов в импульсном процессе по сравнению

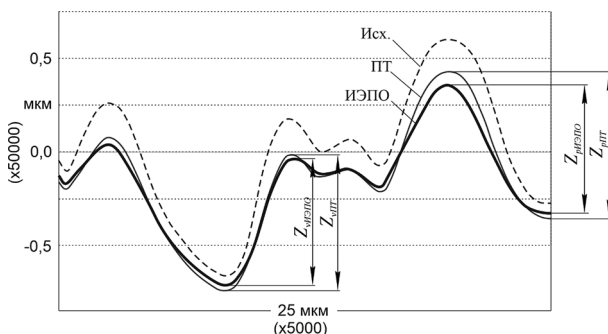


Рисунок 3 — Схема формирования профиля поверхности при в управляемых импульсных режимах ЭПО
Figure 3 — Scheme of surface profile formation in controlled pulsed electrolytic-plasma treatment modes

с обработкой на постоянном токе подтверждается динамикой изменения параметра R_{sk} , определяющего асимметричность профиля (преобладание выступов или впадин) — для импульсного режима параметр R_{sk} выше, что свидетельствует о более интенсивном сглаживании выступов.

Список литературы

1. Surface finish machining of medical parts using plasma electrolytic polishing / H. Zeidler, F. Boettger-Hiller, J. Edelmann, A. Schubert // *Procedia CIRP*. — 2016. — Vol. 49. — P. 83–87. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.038>.
2. Многоэтапная электролитно-плазменная обработка изделий из титана и титановых сплавов / А.М. Смыслов, М.К. Смыслова, А.Д. Мингажев, К.С. Селиванов // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. — 2009. — Т. 13, № 1(34). — С. 141–145.
3. Таминдаров, Д.Р. Влияние состава электролита на процесс электролитно-плазменного полирования титановых сплавов / Д.Р. Таминдаров, А.М. Смыслов, А.В. Сидельников // *Физика и химия обработки материалов*. — 2022. — № 5. — С. 31–38. — DOI: <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2022-5-31-38>.
4. Investigation of post-processing of additively manufactured Nitinol smart springs with plasma-electrolytic polishing / V.N. Stepputat, H. Zeidler, D. Safranchik [et al.] // *Materials*. — 2021. — Vol. 14, iss. 15. — DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14154093>.
5. Plasma electrolytic polishing of Nitinol: investigation of functional properties. / K. Navickaitė, L. Ianniciello, J. Tušek [et al.] // *Materials*. — 2021. — Vol. 14, iss. 21. — DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14216450>.
6. Алексеев, Ю.Г. Электролитно-плазменное полирование кобальт-хромовых сплавов медицинского назначения / Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв, В.С. Нисс // *Вестні НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. — 2019. — Т. 64, № 3. — С. 296–303. — DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-296-303>.
7. Plasma electrolyte polishing of titanium and niobium alloys in low concentrated salt solution based electrolyte / Yu. Aliakseyeu, A. Bubulis, A. Korolyov [et al.] // *Mechanika*. — 2021. — Vol. 27, no. 1. — P. 88–93. — DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j02.mech.25044>.
8. Electrolytic plasma polishing of NiTi alloy / A. Korolyov, A. Bubulis, J. Vėžys [et al.] // *Mathematical models in engineering*. — 2021. — Vol. 7, iss. 4. — P. 70–80. — DOI: <https://doi.org/10.21595/mme.2021.22351>.
9. Mechanical and plasma electrolytic polishing of dental alloys / K. Witzke, R. Kensbock, C. Willsch [et al.] // *Materials*. — 2023. — Vol. 16, iss. 18. — DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16186222>.
10. Добрынин, Д.А. Электролитно-плазменное полирование титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 / Д.А. Добрынин // *Труды ВИАМ*. — 2017. — № 7(55). — С. 12–21. — DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-7-2-2>.
11. Куликов, И.С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И.С. Куликов, С.В. Ващенко, А.Я. Каменев. — Минск: Беларус. навука, 2010. — 232 с.
12. Электролитно-плазменная обработка в управляемых импульсных режимах / А.Ю. Королёв, Ю.Г. Алексеев, В.С. Нисс, А.Э. Паршута // *Наука и техника*. — 2021. — Т. 20, № 4. — С. 279–286. — DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-279-286>.
13. Электроимпульсное полирование сплавов на основе железа, хрома и никеля / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский, Г.Я. Беляев. — Минск: БНТУ, 2014. — 325 с.
14. Грилихес, С.Я. Электрохимическое и химическое полирование. Теория и практика. Влияние на свойства металлов / С.Я. Грилихес. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. — 232 с.
15. Leach, R. Fundamental principles of engineering nanometrology / R. Leach // *Surface Topography Characterisation in Micro and Nano Technologies*. — William Andrew Publishing, 2014. — P. 241–294.

KOROLYOV Aleksandr Yu., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Research Sector of Advanced Technologies¹

E-mail: korolyov@park.bntu.by

TOMILO Vyacheslav A., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department “Machines and Technology of Metal Forming”²

E-mail: stamila@rambler.ru

NISS Vladimir S., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Innovation and Production Center for Medical Equipment and Products³

E-mail: niss@park.bntu.by

¹Scientific and Technological Park of BNTU “Polytechnic”, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

³Research Polytechnic Institute of BNTU, Minsk, Republic of Belarus

Received May 16, 2025.

FORMATION OF SURFACE PROFILE IN CONTROLLED PULSE MODES OF ELECTROLYTIC-PLASMA TREATMENT

To improve the efficiency of electrolytic-plasma treatment methods, modes based on the use of controlled pulses have been developed. The modes are implemented by alternating high-voltage pulses corresponding to the electrolytic-plasma region and current-free pauses between them. At the initial moment of switching on the high-voltage pulse, the electrochemical mode is in effect (at the stage of forming the vapor-gas shell). The efficiency of the pulse process is increased by intensive metal removal during the electrochemical mode and optimization of the duration of the electrolytic-plasma mode, which ensures high surface quality. Ac-

cording to the research results, it has been established that the developed pulse method, due to combining the advantages of both the electrolytic-plasma and electrochemical modes, ensures the formation of a surface with a smoother and flatter profile of microroughnesses compared to traditional electrolytic-plasma treatment with direct current. The presence of the electrochemical component leads to the preferential dissolution of high protrusions and intensive smoothing of irregularities, which helps to reduce the profile inclination angle and reduce the number of protrusions per unit length (HSC parameter). The accentuated dissolution of protrusions in the pulse process compared to direct current processing is confirmed by the dynamics of the change in the R_{sk} parameter, which determines the profile asymmetry (predominance of protrusions or depressions) — for the pulse mode, the R_{sk} parameter has higher values, which indicates a more intensive smoothing of protrusions.

Keywords: electrolytic-plasma treatment, pulses, vapor-gas shell, anodic process, current density, roughness parameters

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-3-72-46-53>

References

1. Zeidler H., Boettger-Hiller F., Edelmann J., Schubert A. Surface finish machining of medical parts using plasma electrolytic polishing. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 49, pp. 83–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.038>.
2. Smyslov A.M., Smyslova M.K., Mingazhev A.D., Selivanov K.S. Mnogoetapnaya elektrolitno-plazmennaya obrabotka izdeliy iz titana i titanovykh splavov [Multistage plasma electrolytic treatment of titanium and titanium alloy products]. *Vestnik USATU*, 2009, vol. 13, no. 1(34), pp. 141–145 (in Russ.).
3. Tamindarov D.R., Smyslov A.M., Sidelnikov A.V. Vliyanie sostava elektrolita na protsess elektrolitno-plazmennogo polirovaniya titanovykh splavov [Influence of electrolyte composition on the process of electrolytic-plasma polishing of titanium alloys]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2022, no. 5, pp. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2022-5-31-38> (in Russ.).
4. Stepputat V.N., Zeidler H., Safranchik D., Strokin E., Böttger-Hiller F. Investigation of post-processing of additively manufactured Nitinol smart springs with plasma-electrolytic polishing. *Materials*, 2021, vol. 14, iss. 15. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14154093>.
5. Navickaitė K., et al. Plasma electrolytic polishing of Nitinol: investigation of functional properties. *Materials*, 2021, vol. 14, iss. 21. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14216450>.
6. Aliakseyeu Yu.G., Korolyov A.Yu., Niss V.S. Elektrolitno-plazmennoe polirovanie kobalt-khromovykh splavov meditsinskogo naznacheniya [Electrolytic-plasma polishing of cobalt-chromium alloys for medical products]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 296–303. DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-296-303> (in Russ.).
7. Aliakseyeu Yu., Bubulis A., Korolyov A., Niss V., Kandrotaitė Janutienė R. Plasma electrolyte polishing of titanium and niobium alloys in low concentrated salt solution based electrolyte. *Mechanika*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 88–93. DOI: <https://doi.org/10.5755/j02.mech.25044>.
8. Korolyov A., et al. Electrolytic plasma polishing of NiTi alloy. *Mathematical models in engineering*, 2021, vol. 7, iss. 4, pp. 70–80. DOI: <https://doi.org/10.21595/mme.2021.22351>.
9. Witzke K., et al. Mechanical and plasma electrolytic polishing of dental alloys. *Materials*, 2023, vol. 16, iss. 18. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16186222>.
10. Dobrynin D.A. Elektrolitno-plazmennoe polirovanie titanovykh splavov VT6 i VT8M-1 [Plasma electrolytic polishing of titanium alloys VT6 and VT8M-1]. *Proceedings of VIAM*, 2017, no. 7(55), pp. 12–21. DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-7-2-2> (in Russ.).
11. Kulikov I.S., Vashchenko S.V., Kamenev A.Ya. *Elektrolitno-plazmennaya obrabotka materialov* [Plasma electrolytic treatment of materials]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2010. 232 p. (in Russ.).
12. Korolyov A.Yu., Aliakseyeu Yu.G., Niss V.S., Parshuto A.E. Elektrolitno-plazmennaya obrabotka v upravlyaemykh impulsnykh rezhimakh [Electrolyte-plasma treatment in controlled pulse modes]. *Science & technique*, 2021, vol. 20, no. 4, pp. 279–286. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-279-286> (in Russ.).
13. Sinkevich Yu.V., Sheleg V.K., Yankovsky I.N., Belyaev G.Ya. *Elektroimpulsnoe polirovanie splavov na osnove zheleza, khroma i nikelya* [Electroimpulse polishing of iron-, chromium-, and nickel-based alloys]. Minsk, Belorusskiy natsionalnyy tekhnicheskii universitet Publ., 2014. 325 p. (in Russ.).
14. Grilikhes S.Ya. *Elektrokhimicheskoe i khimicheskoe polirovanie. Teoriya i praktika. Vliyanie na svoystva metallov* [Electrochemical and chemical polishing: Theory and practice. Influence on metal properties]. Leningrad, Mashinostroyeniye. Leningradskoe otdeleniye Publ., 1987. 232 p. (in Russ.).
15. Leach R. Surface topography characterisation in micro and nano technologies. *Fundamental principles of engineering nanometrology*, 2014, pp. 241–294.