

2. Тимошков, Ю. В., Губаревич Т. М., Ореховская Т. И., Молчан И. С., Курмашев В. И. Свойства композиционных никелевых покрытий с различными типами ультрадисперсных алмазных частиц // Гальванотехника и обработка поверхности, 1999, т.7, № 2, с. 20–25.

3. Ващенко, С. В., Соловьева З. А. Электроосаждение износостойких хромовых покрытий из электролитов с ультрадисперсными алмазными порошками // Гальванотехника и обработка поверхности, 1(1992), № 5 – 6, 45 – 48.

4. Гинзбург, Б. М., Байдакова, М. В., Киреевко, О.Ф., Точильников, Д. Г., Шепелевский, А. А. // Влияние фуллерена C60, фуллереновых саж и других углеродных материалов на граничное трение скольжения металлов / Журнал технической физики, 2000, том 70, вып. 12, С. 87–97

*Поступила 19.10.2020*

**УДК 621.794**

**Синькевич Ю.В.**

## **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ ПОЛИРОВАНИИ**

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*Приведено описание методов исследования точности обработки при электроимпульсном полировании железо-никель-хромовых сплавов путем изучения распределения электрического поля в электролите, определения рассеивающей способности электролита, волнистости и отклонения от круглости поверхности образцов. Производительность обработки оценивалась по величине удельного съема металла с поверхности и съема металла на сторону.*

**Введение.** Для электрохимических методов обработки обеспечение точности является одной из сложнейших задач [1]. Съем металла на различных участках поверхности заготовки сложной конфигурации напрямую связан с пространственно-временной эпюрой локальных скоростей анодного растворения металла. В общем случае равномерность съема металла, определяющая точность обработки, характеризуется равномерностью распределения электрического тока на различных участках обрабатываемой поверхности. При электрохимической обработке на распределение электрического тока оказывает влияние ряд трудно учитываемых факторов, в частности, расположение электродов относительно друг друга и относительно стенок электролитической ячейки, конфигурация и размер электродов и ячейки, величина поляризации электродов, электропроводность электролита, гидродинамические явления в электролите и другие факторы [2].

Для оценки равномерности распределения электрического тока на поверхности электродов существует несколько методов, которые можно объединить в три группы:

1. Графический метод [3], основанный на исследовании поляризации электродов. Основной недостаток метода заключается в сложности снятия воспроизводимых кривых поляризации.

2. Метод построения электрического поля [3], сущность которого заключается в том, что в результате измерений потенциалов в различных точках электролитической ячейки строится электрическое поле в виде графика распределения эквипотенциальных и силовых линий.

3. Метод, основанный на исследовании распределения тока непосредственно на поверхности электродов [2].

Первые два метода характеризуется большой трудоемкостью и не обеспечивают достоверных воспроизводимых результатов. В настоящее время третий метод получил наибольшее научно-практическое применение.

**Методики исследований.** Для исследования распределения электрического поля в электролите в условиях электроимпульсного полирования (ЭИП) использовалось устройство, схема которого представлена на рисунке 1. Оно включает набор датчиков  $E1-EN$  и запоминающее устройство, выполненное на базе конденсаторов  $C1-CN$  небольшой емкости (0,1 мкФ) и диодных ключей  $VD1-VDN$ .

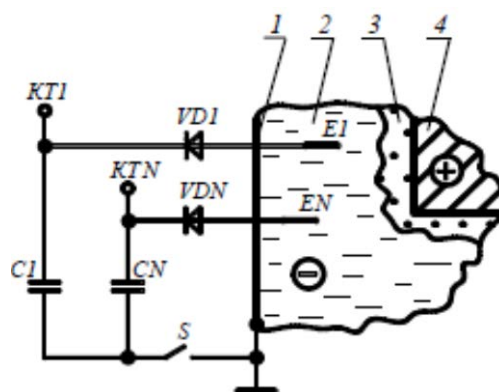


Рис. 1. Схема устройства для исследования распределения электрических потенциалов в электролитической ячейке (фрагмент)

1 – катод; 2 – электролит; 3 – парогазовая оболочка; 4 – анод

При подаче на электролитическую ячейку напряжения обработки между анодом 4 и катодом 1 в электролите 2 возникает электрический ток, приводящий к образованию парогазовой оболочки (ПГО) 3 и перераспределению электрических потенциалов в электролите. После образования динамически устойчивой ПГО к катоду переключателем  $S$  подключались конденсаторы  $C1-CN$  через диодные ключи  $VD1-VDN$ . После зарядки конденсаторы отключались от катода и выключался источник тока. Электрические потенциалы, характерные для каждой исследуемой точки в электролите, измерялись в контрольно-измерительных точках  $KT1-KN$  высокоомным электронным вольтметром ВЗ-55. Величина измеренных потенциалов корректировалась на величину падения напряжения на диодах  $VD1-VDN$ .

Исследование равномерности распределения электрического тока на поверхности анода в условиях ЭИП выполнялось по методике определения рассеивающей способности электролита. Термин «рассеивающая способность электролита» означает способность электролита перераспределять электрический ток в электролитической ячейке в зависимости от ее конфигурации, состава, физико-механических свойств электролита и режима электролиза. Для анодной обработки рассеивающая способность электролита характеризует равномерность съема металла с различных участков обрабатываемой поверхности, а, следовательно, точность обработки.

**Основные результаты.** Электрический ток, проходя через электролит, на своем пути от катода до различных участков поверхности анода встречает неодинаковое электрическое сопротивление  $R$ , которое в общем случае можно представить в виде равенства:

$$R = R_{\text{перех}} + R_{\text{эл}} + R_{\text{мет}}, \quad (1)$$

где  $R_{\text{перех}}$  – переходное сопротивление на границе раздела фаз «электрод–электролит», равное сумме переходных сопротивлений на границах раздела фаз «катод–электролит»  $R_{\text{перех}}^{\text{к}}$  и «электролит–анод»  $R_{\text{перех}}^{\text{а}}$ ;  $R_{\text{эл}}$  – сопротивление электролита;  $R_{\text{мет}}$  – суммарное сопротивление металлических электродов (анода и катода), которое можно не учитывать ввиду его пренебрежительно малой величины по сравнению с остальными слагаемыми в (1).

В зависимости от соотношения  $R_{\text{перех}}$  и  $R_{\text{эл}}$  возможно два граничных случая распределения тока на поверхности электродов [4]:

1. При  $R_{\text{эл}} \gg R_{\text{перех}}$  равномерность распределения тока минимальна и определяется в основном величиной межэлектродного расстояния;

2. При  $R_{\text{эл}} \ll R_{\text{перех}}$  различия в межэлектродных расстояниях не оказывают существенного влияния на равномерность распределения тока на поверхности электродов.

При ЭИП в качестве переходного сопротивления на границе раздела фаз «электролит–анод»  $R_{\text{перех}}^{\text{а}}$  примем электрическое сопротивление ПГО  $R_{\text{ПГО}}$ . Численная оценка удельного сопротивления ПГО, выполненная по данным, приведенным в монографиях [5, 6], дает величину равную 500–2000 Ом·см<sup>2</sup>. Следовательно, с учетом того, что растворы электролита для ЭИП обладают высокой электропроводностью  $\chi \geq 0,05 - 0,06 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  [5, 6]), а отношение  $R_{\text{перех}}^{\text{а}} / R_{\text{перех}}^{\text{к}} \gg 100$ , слагаемыми  $R_{\text{перех}}^{\text{к}}$  и  $R_{\text{эл}}$  в (1) можно пренебречь. Тогда равенство (1) примет вид:

$$R \approx R_{\text{перех}}^{\text{а}} = R_{\text{ПГО}}$$

Учитывая общую электрохимическую природу процессов ЭИП и электрохимического полирования (ЭХП) и необходимость сравнительного анализа полученных данных, исследование влияния геометрических факторов обработки (конфигурации и размеров электролитической ячейки и электродов, расположения электродов относительно друг друга и относительно стенок ячейки) на рассеивающую способность электролита и точность обработки наружных цилиндрических поверхностей выполнялось для обоих методов обработки с использованием устройства, схема которого представлена на рисунке 2.

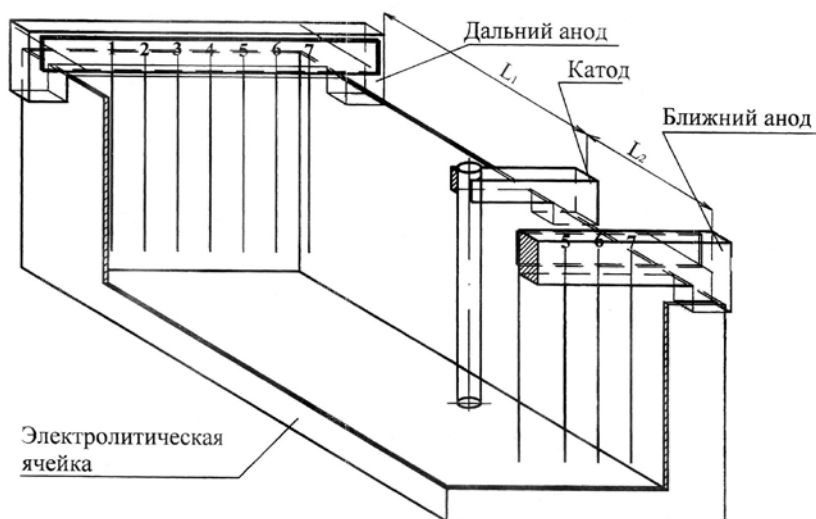


Рис. 2. Схема устройства для исследования рассеивающей способности электролита.  
1–7 – секции разборного анода

По обе стороны от катода на расстояниях  $L_1 = 250 \pm 1$  мм и  $L_2 = 50 \pm 1$  мм в электролите перпендикулярно продольной оси ячейки вертикально размещались два разборных анода – дальний и ближний. Каждый анод состоял из семи секций. В качестве секций использовались цилиндрические образцы размером  $\varnothing 1,5 \times 100$  мм из стали 12X18H10T. Расстояние между секциями в разборных анодах составляло  $25 \pm 1$  мм. ЭИП проводилось в течение  $10 \pm 0,05$  мин при напряжении обработки  $310 \pm 5$  В и температуре электролита  $80 \pm 2$  °С. В качестве электролита для ЭИП использовался 5 %-ный водный раствор сульфата аммония. Состав раствора электролита и режимы ЭХП представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Состав раствора электролита и режимы ЭХП [7]

Наименование параметра	Значение параметра
Состав раствора электролита, масс. %:	
• H3PO4	70
• H2SO4	20
• H2O	10
Режим электролиза:	
• плотность электрического тока, А/дм <sup>2</sup>	70
• температура электролита, °С	80
• продолжительность обработки, мин	5

До и после обработки секции разборных анодов промывались в дистиллированной воде и сушились фильтровальной бумагой, после чего они взвешивались на аналитических весах ВЛР-200 с точностью  $\pm 0,00005$  г. Диаметральные размеры секций измерялись микрометром МК 0–25–0,01, линейные – штангенциркулем ШЦ-П-125–0,1.

Рассеивающая способность электролита рассчитывалась по формуле [2]:

$$T = \frac{K - M_{\sigma} / M_{\text{Д}}}{K - 1} 100 \%,$$

где  $T$  – рассеивающая способность электролита, %;  $K$  – коэффициент, равный отношению расстояния  $L_1$  к расстоянию  $L_2$  (рисунок 2);  $M_{\text{б}}$ ;  $M_{\text{д}}$  – средний удельный съём металла с поверхности соответственно ближнего и дальнего анодов,  $\text{мг}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$ .

Удельный съём металла с поверхности каждой секции разборных анодов рассчитывался по формуле:

$$M_i = \frac{P_0^i - P_1^i}{S_i \tau},$$

где  $M_i$  – удельный съём металла с поверхности  $i$ -той секции,  $\text{мг}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$ ;  $P_0^i$ ;  $P_1^i$  – масса  $i$ -той секции разборных анодов соответственно до и после обработки,  $\text{мг}$ ;  $S_i$  – площадь обрабатываемой поверхности  $i$ -той секции разборных анодов,  $\text{см}^2$ ;  $\tau$  – продолжительность обработки,  $\text{мин}$ .

Средний удельный съём металла с поверхности ближнего  $M_{\text{б}}$  и дальнего  $M_{\text{д}}$  разборных анодов рассчитывался по формулам:

$$M_{\text{б}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i^{\text{б}}}{n}, \dots M_{\text{д}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i^{\text{д}}}{n} \quad (2)$$

где  $M_i^{\text{б}}$  – удельный съём металла с поверхности  $i$ -той секции ближнего анода,  $\text{мг}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$ ;  $M_i^{\text{д}}$  – удельный съём металла с поверхности  $i$ -той секции дальнего анода,  $\text{мг}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$ ;  $n = 7$  – количество секций в разборных анодах.

Следует отметить, что согласно источнику [3] для электрохимических методов обработки при исследовании рассеивающей способности электролитов одним из основных требований является необходимость учета геометрических факторов обработки, поскольку полученные данные могут иметь частные значения, корректные для электролитической ячейки определенной конфигурации и размеров. По этой причине при исследовании влияния геометрических факторов обработки на рассеивающую способность электролита при ЭИП дополнительно проведен эксперимент в электролитической ячейке цилиндрической формы размером  $\text{Ø}400 \times 350$  мм, аналогичный выше описанному.

Влияние распределения силовых линий электрического поля в электролитической ячейке на равномерность съёма металла с обрабатываемой поверхности исследовалось по методике, сущность которой заключается в том, что в электролитической ячейке, представленной на рисунке 3, размещался один разборный анод вдоль продольной оси ячейки перпендикулярно плоскому катоду на расстоянии  $L_1 = 270 \pm 1$  мм от катода до первой секции разборного анода. Расстояние между секциями разборного анода составляло  $50 \pm 1$  мм.

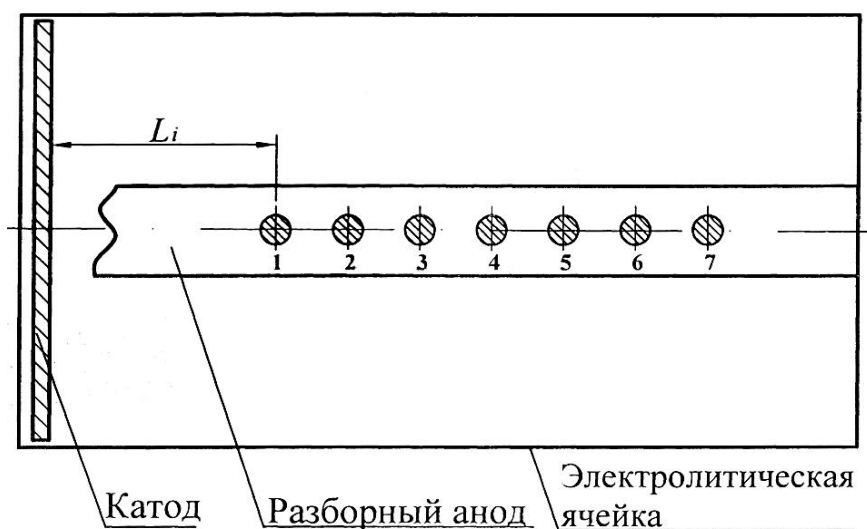


Рис. 3. Схема устройства для исследования равномерности съема металла

Величина съема металла на сторону на секциях разборного анода рассчитывалась по формуле:

$$G_i = \frac{P_0^i - P_1^i}{S_i \rho}, \quad (3)$$

где  $G_i$  – съем металла на сторону с поверхности  $i$ -той секции разборного анода, мм;  $P_0^i; P_1^i$  – масса  $i$ -той секции разборного анода соответственно до и после обработки, г;  $S_i$  – площадь обрабатываемой поверхности  $i$ -той секции разборного анода, мм<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность стали 12X18H10T, г/мм<sup>3</sup> (принята равной  $7,9 \cdot 10^{-3}$  г/мм<sup>3</sup>).

Сравнительный анализ точности обработки методами ЭИП и ЭХП дополнительно производился с помощью круглограмм, по которым определялись волнистость и отклонение от круглости поверхности образцов. Обработка проводилась по схеме, представленной на рисунке 3. В этом случае разборный анод состоял из двух цилиндрических шлифованных секций из стали 12X18H10T размером  $\varnothing 4 \times 60$  мм, расположенных на расстояниях от катода до ближней и дальней секций анода соответственно равных  $270 \pm 1$  и  $570 \pm 1$  мм.

Снятие круглограмм и измерение волнистости и отклонения от круглости поверхности проводилось на измерительной системе Talirond-73 (Rank Taylor Hobson, Англия) в пяти сечениях для каждой секции с шагом 10 мм, начиная от нижнего торца секции. Измерение отклонений от круглости производилось путем прецизионного вращения измерительного преобразователя прибора относительно поверхности секции последовательно в каждом сечении. Вокруг полученного реального профиля поверхности прибор автоматически описывал мнимую прилегающую окружность, относительно которой производилось измерение отклонения от круглости как наибольшего расстояния от точек реального профиля поверхности образца до мнимой прилегающей окружности с точностью  $\pm 0,05$  мкм.

Производительность обработки при ЭИП оценивалась по величине среднего удельного съема металла с поверхности образца, которая рассчитывалась по (2), и средней величине съема металла на сторону, которая рассчитывалась по (3). При вы-

полнении расчетов плотность сталей 10; 20 и 35 принята равной  $7,85 \cdot 10^{-3}$  г/мм<sup>3</sup>, сталей 20Х13 и 40Х13 – соответственно  $7,67 \cdot 10^{-3}$  г/мм<sup>3</sup> и  $7,65 \cdot 10^{-3}$  г/мм<sup>3</sup>.

**Вывод.** Представленные в статье методы оценки точности и производительности обработки использованы при проведении исследований и разработке метода ЭИП железо-никель-хромовых сплавов [8].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вдовенко, В. Г. Эффективность электрохимической обработки деталей : монография / В. Г. Вдовенко. – Красноярск : Изд-во красноярского ун-та, 1991. – 158 с.
2. Кудрявцев, Н.Т. Электролитические покрытия металлами / Н.Т. Кудрявцев. – М. : Химия, 1979. – 352 с.
3. Ваграмян, А. Т. Распределение тока на поверхности электродов при электроосаждении металлов / А. Т. Ваграмян, Т. Б. Ильина-Какуева. – М. : Metallurgizdat, 1956. – 66 с.
4. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Под общ. ред. В. А. Волосатова. – Л. : Машиностроение, 1988. – 719 с.
5. Дураджи, В. Н. Нагрев металлов в электролитной плазме / В. Н. Дураджи, А. С. Парсаданян; под общ. ред. А.С. Парсаданяна. – Кишинев : Штиинца, 1988. – 216 с.
6. Куликов, И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев. – Минск : Беларуская навука, 2010. – 232 с.
7. Грилихес, С. Я. Электрохимическое полирование / С. Я. Грилихес. – Л. : Машиностроение, 1976. – 208 с.
8. Синькевич, Ю. В. Теоретические и технологические основы электроимпульсного полирования изделий из сплавов на основе железа, хрома и никеля : автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.07 / Ю. В. Синькевич; Белорус. национал. техн. ун-т. – Минск, 2015. – 46 с.

*Поступила 10.04.2020*

УДК 006.06

**Соломахо В.Л., Цитович Б.В.**

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОНКУРИРУЮЩИХ СТАНДАРТОВ ДОПУСКОВ РАЗМЕРОВ, ФОРМЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

*Белорусский национальный технический университет*

*Белорусский государственный институт повышения квалификации и*

*переподготовки кадров по стандартизации, метрологии и управлению качеством*

*Минск, Беларусь*

*В статье представлены сведения о стандартах допусков размеров, формы и расположения поверхностей, одновременно действующих в Республике Беларусь и относящихся к двум разным системам стандартов (Межгосударственным стандартам и стандартам ИСО). Традиционно применявшаяся система Межгосударственных стандартов (стандарты с индексом «ГОСТ») существенно отличается от системы, положенной в основу стандартов ИСО.*

*Целью статьи является их совместный анализ и оценка возможностей параллельного или конкурентного применения. Предложены рекомендации эффективного использования рассмотренных систем стандартов при проектировании изделий.*