

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-22-27



УДК 621.9.047

UDC 621.9.047

2.5.6 – технология машиностроения

**ВЫРАВНИВАНИЕ ИСХОДНОЙ
НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПРИПУСКА
ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ
РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ
ПРИ ДИСКРЕТНОЙ ПОДАЧЕ
ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА**

**ALIGNMENT OF THE INITIAL
UNEVENNESS OF THE ALLOWANCE
FOR ELECTROCHEMICAL
DIMENSIONAL MACHINING
WITH DISCRETE FEED OF THE
TOOL ELECTRODE**

Болдырев Александр Александрович,
к.т.н., доцент кафедры технологии машино-
строения, Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж,
e-mail: alexboldyrev@yandex.ru

Boldyrev Alexander Aleksandrovich,
candidate of technical sciences, associate professor of
the department of mechanical engineering technol-
ogy, Voronezh state technical university, Voronezh,
e-mail: alexboldyrev@yandex.ru

✉¹ **Перова Алла Владимировна,**
к.т.н., доцент кафедры технологии машино-
строения, Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж,
e-mail: pva7@mail.ru

✉¹ **Perova Alla Vladimirovna,**
candidate of technical sciences, associate professor of
the department of mechanical engineering technol-
ogy, Voronezh state technical university, Voronezh,
e-mail pva7@mail.ru

Григораш Владимир Васильевич,
к.т.н., доцент кафедры металлических и
деревянных конструкций, Воронежский
государственный технический университет,
г. Воронеж.

Grigorash Vladimir Vasilyevich,
candidate of technical sciences, associate professor of
the department of metal and wooden structures,
Voronezh state technical university, Voronezh.

Падурец Анна Александровна,
магистрант кафедры технологии машиностро-
ения, Воронежский государственный техниче-
ский университет, г. Воронеж.

Padurets Anna Alexandrovna,
master's student of the department of mechanical
engineering technology, Voronezh state technical
university, Voronezh.

Болдырев Александр Иванович,
д.т.н., профессор кафедры технологии маши-
ностроения, Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж.

Boldyrev Alexander Ivanovich,
doctor of technical sciences, professor of the de-
partment of mechanical engineering technology,
Voronezh state technical university, Voronezh.

Аннотация. В статье рассматривается про-
блема прогнозирования распределения при-
пусков в процессе электрохимической раз-
мерной обработки, учитывающая неравно-
мерность припуска на заготовке. Предлага-
ется математическая модель выравнивания
припусков на деталях. Результаты теоретиче-
ского исследования удовлетворительно со-
гласуются с экспериментальными данными.

Annotation. This article examines the problem of
predicting the distribution of allowances during
electrochemical dimensional machining, taking
into account the unevenness of the allowance on the
workpiece. A mathematical model for equalizing
allowances on parts is proposed. The results of the
theoretical study are in satisfactory agreement with
experimental data.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА, ДИСКРЕТНАЯ ПОДАЧА ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА, ВЫРАВНИВАНИЕ ПРИПУСКА.

Keywords: ELECTROCHEMICAL DIMENSIONAL MACHINING, DISCRETE FEED OF THE TOOL ELECTRODE, ALLOWANCE ALIGNMENT.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

При электрохимической размерной обработке (ЭХРО) заготовок, полученных методом литья или горячей штамповки, существенное влияние на точность формообразования оказывает погрешность, определяемая исходной неравномерностью припуска заготовки [1]. Уменьшение ее величины достигается, главным образом, ведением процесса анодного растворения на малых межэлектродных зазорах (МЭЗ), применением пассивирующих электролитов [2, 3] и повышением качества исходных заготовок [4]. Реализация перечисленных факторов связана, как правило, с ухудшением экономических показателей внедряемого процесса ЭХРО [5]. Поэтому наличие возможности математического анализа погрешностей, определяемых неравномерностью припуска, позволяет путем варьирования технологических параметров ЭХРО проектировать наиболее оптимальный технологический процесс изготовления детали [6]. Существующие математические модели [7-12] представляют кинетику выравнивания припуска на деталях в зависимости или от наперед заданной постоянной, или от изменяющейся по определенному закону скорости движения электрода-инструмента (ЭИ).

Для схемы ЭХРО с дискретной подачей ЭИ, т.е. с периодической корректировкой МЭЗ путем касания электродов и отвода их на постоянную величину a , соответствующая модель отсутствует. Создание математической модели для данной схемы обработки усложняется тем, что подача ЭИ зависит от распределения припуска после каждого цикла анодного растворения металла.

2 Материалы и методы

Математическое представление выравнивания припуска при дискретной подаче ЭИ сводится к последовательному определению [13]:

- точки касания ЭИ с обрабатываемой поверхностью;
- расстояние ЭИ до своего конечного положения S ;
- величин МЭЗ в точках β_m , $m = 1, 2, \dots, n$ (β_m – угол между направлением подачи ЭИ и нормалью к поверхности детали в точке m);
- съема металла при полученном распределении припусков z_m .

Пусть поверхность детали определена точками M_m^0 , координаты которых заданы системой центров кривизны C_m , системой радиусов кривизны R_m , углами β_m и координатами точек сопряжения B_m (рис. 1).

$$\overline{M_m^0}(\beta) = C_m + R_m e^{i\beta}. \quad (1)$$

В установившемся режиме при идеальном процессе МЭЗ определяются по формуле:

$$a_n = \frac{a}{\cos \beta}, \quad (2)$$

где a – величина лобового зазора, т. е. зазора на участке $\beta = 0$.

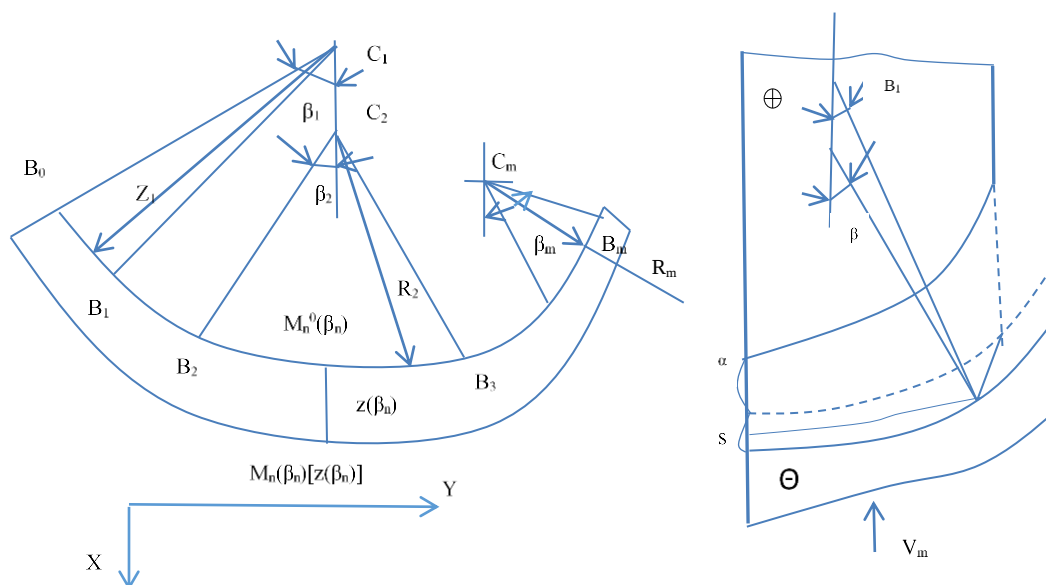


Рисунок 1 – Схема электрохимической ячейки

Соответственно координаты точек ЭИ в конечном положении определяются как

$$\overline{N}_p^0(\beta) = \overline{M}_m^0(\beta) + \frac{a}{\cos \beta} \cdot e^{i\beta}. \quad (3)$$

Координаты точек профиля исходной заготовки с припуском (припуск по нормали к профилю) представляются как:

$$\overline{M}_m(\beta; z) = \overline{M}_m^0(\beta) + z \cdot e^{i\beta}. \quad (4)$$

Обозначив путь, проходимый ЭИ через S , координаты точек начального положения электрода представляются в виде:

$$N_p(\beta, S) = \overline{N}_p^k + S. \quad (5)$$

В момент касания электродов координаты точек инструмента переместятся на величину a :

$$\overline{N}_p(\beta; S) = \overline{N}_p^k + S - a. \quad (6)$$

В этом случае имеет место равенство координат каких-либо точек на аноде и катоде:

$$\overline{N}_L(\beta'; S - a) = \overline{M}_m(\beta; z), \quad (7)$$

где β' – угол между направлением подачи и нормалью к внутренней поверхности ЭИ в точке касания.

С учетом уравнений (1)-(6) равенство (7) примет вид:

$$\overline{M}_L^0(\beta') + \frac{a}{\cos \beta'} \cdot l^{i\beta'} + S - a = \overline{M}_m^0(\beta) + z \cdot l^{i\beta}. \quad (8)$$

Умножив обе части равенства на $e^{-i\beta'}$ и приравняв вещественную и мнимую части, получим:

$$\left. \begin{aligned} (R_m + \frac{a}{\cos \beta'}) \cos(\beta' - \beta) + (S - a) \cos \beta &= R_m + z \\ (R_m + \frac{a}{\cos \beta'}) \sin(\beta' - \beta) - (S - a) \sin \beta &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В систему (9) входят два нелинейных неоднородных уравнения с неизвестными β' и S . Делая соответствующие преобразования, получаем следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (R_m + \frac{a}{\cos \beta'}) \sin \beta' &= (R_m + z) \sin \beta; \\ (S - a) \sin \beta &= (R_m + z) \sin(\beta' - \beta). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Исходя из некоторого начального значения β' (например, $\beta = 0$), из первого уравнения системы (10) методом последовательного приближения определяем неизвестное β' :

$$\left. \begin{aligned} \beta'_{k+1} &= \arcsin \frac{(R_m + z) \sin \beta}{R_m + (a / \cos \beta'_k)}; k = 0; 1; 2 \\ \beta'_0 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Итерационный процесс продолжается до получения необходимой точности, т.е. выполнения условия:

$$|\beta'_{k+1} - \beta'_k| \leq \varepsilon, \quad (12)$$

где ε – степень точности.

Зная β' из уравнения (10), определяем неизвестное S .

Величины β' и S рассчитываются для всех углов β , затем из множества полученных значений S выбирается наибольшее. При этом положении ЭИ определяются локальные зазоры $a_n(\beta)$. Это выполнимо, если по аналогии с уравнениями (9) с учетом $a_n(\beta)$ составим систему уравнений:

$$a_n = \left(R_m + \frac{a}{\cos \beta'} \right) \cos(\beta' - \beta) + S \cos \beta - R_m + z. \quad (13)$$

Дифференциальное уравнение процесса ЭХРО имеет вид:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{A}{a_n}. \quad (14)$$

Характеристика режима обработки A [7] определена по зависимости:

$$A = \eta \varepsilon \nu \chi [U - (\varphi_a - \varphi_k)], \quad (15)$$

где η – выход по току; ε – электрохимический эквивалент, кг/Кл; ν – скорость анодного растворения, А/см²; χ – удельная проводимость электролита, См/м; U – напряжение на электродах, В; $(\varphi_a - \varphi_k)$ – потенциал разложения электролита, В.

Уравнение (14) целесообразно решать в последовательности, подобной циклу работы станка:

1. Разбиваем время на ряд небольших интервалов:

$$0 < t < h; h < t < 2h; \dots; T - h < t < T.$$

В течение интервала ЭИ движется со скоростью:

$$V = A / (a \cdot \cos \beta^*), \quad (16)$$

где β^* – угол, соответствующий точке касания в начале интервала при $(n-1)h < t \leq nh$;

2. По функции $z(\beta, 0)$ определяем $S(0)$; $\beta^*(0)$.
3. По уравнению (13) определяем $a_n(\beta, 0)$.
4. Съём в каждой точке по разностному аналогу составит:

$$\Delta z_1 = (A \cdot h) / a_n(\beta, 0). \quad (17)$$

5. Вычисляем полное распределение z по всей ширине детали (лопатки).
6. Алгоритм повторяется, начиная с п. 2 до тех пор, пока припуск z в какой-либо точке не стане равным 0.

3 Результаты исследований

При разработке технологии изготовления деталей, например, турбинных лопаток, имея исходное заданное чертежом колебание припуска на заготовке и решая систему посредством ЭВМ, получаем текущие значения припуска на различных участках лопатки при схеме обработки с дискретной подачей ЭИ.

В качестве примера в таблице представлен расчет погрешности обработки Δ_K , обусловленной влиянием исходной погрешности припуска (минимальное и максимальное значения 3 и 8 мм, соответственно). Для сравнения там же представлены результаты экспериментальной проверки математической модели выравнивания припуска. В расчете и экспериментах величина отвода ЭИ после касания составляла 0,8 мм.

Анализ сравнения результатов показал, что расхождение расчетных и экспериментальных величин находится в пределах 20 %. При данном исходном припуске наиболее критическая точка находится на участке с углом $\beta = 60^\circ$, имеющем минимальный исходный припуск 3 мм. В этой точке припуск достигает нулевого значения в тот момент, когда на других участках его величина еще достаточно велика.

Таблица – Погрешности обработки Δ_K

Участок с углом β , град	Исходный припуск, мм	Конечный припуск, мм			
		Расчетное значение	Δ_K	Экспериментальное значение	Δ_K
0	3-8	0,22-0,35	0,13	0,11-0,27	0,16
20	3-8	0,19-0,30	0,11	0,10-0,20	0,10
40	3-8	0,10-0,21	0,11	0,06-0,17	0,11
60	3-8	0,00-0,22	0,22	0,00-0,14	0,14

В конце процесса МЭЗ (усредненный) носит установившийся характер, и поэтому для уменьшения погрешности с 0,35 мм до 0,1-0,15 мм достаточно, чтобы в данной точке минимальный исходный припуск был бы равен 3,5-4,0 мм. Таким образом, требования к распределению припуска на участках заготовки с различными углами β неодинаковы.

4 Обсуждение и заключение

При проектировании технологии следует в зависимости от имеющейся заготовки и установленных режимов обработки оценивать погрешность Δ_K . Если необходимо уменьшить значение Δ_K , то следует либо повысить требование к заготовке, либо путем ведения процесса

ЭХРО на меньших МЭЗ и в электролитах, обладающих повышенной избирательной способностью, добиваться более интенсивного выравнивания припуска.

1. Создана математическая модель выравнивания исходной неравномерности припуска для электрохимической размерной обработки с дискретной подачей электрода-инструмента.

2. Проектирование оптимального технологического процесса, например, ЭХРО турбинных лопаток, следует вести путем сопоставления величины Δ_k , рассчитанной при различных сочетаниях исходной неравномерности припуска и вариации параметров процесса.

Список литературы

1 Клоков В.В. Электрохимическое формообразование. Казань: Изд-во Казанского университета, 1984. – 80 с.

2 Теория электрических и физико-химических методов обработки: учебное пособие / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев, Г.П. Смоленцев. Воронеж: Воронежский государственный технический университет. 2007. – 376 с.

3 Зайцев А.Н. Электрохимическая обработка. Теория, технология, оборудование. М.; Инфра-Инженерия. 2024. – 640 с.

4 Современные методы и технологии создания и обработки материалов. В 3-х кн. / под ред. В.Г. Залесского. Минск: ФТИ НАН Беларуси. – 2020. – 354 с.

5 Проектирование технологии и оборудования электрохимических производств: учебное пособие / Т.Н. Останина [и др.]. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета. 2022. – 160 с.

6 Актуальные методы электрохимической обработки поверхностей / Шеханов Р.Ф. [и др.] // Известия вузов. Химия и химическая технология. – Т. 66. – 2023. – № 7. – С. 151-158.

7 Житников В.П., Ошмарина Е.М., Федорова Г.И. Использование разрывных функций для моделирования растворения при стационарном электрохимическом формообразовании // Известия вузов. Математика. – 2010. – № 10. – С. 77-81.

8 Котляр Л.М., Миназетдинов Н.М. Моделирование электрохимического формообразования с использованием криволинейного электрода при ступенчатой зависимости выхода по току от его плотности // Прикладная механика и техническая физика. Т. 57. 2016. № 1. С. 146-155.

9 Конькова О.А. Комплексное моделирование процесса электрохимической обработки // Политехнический молодежный журнал. – 2016. – № 1. – С. 1-7.

10 Болдырев А.А. Оптимизация технологических процессов электрохимической обработки деталей машин / А.И. Болдырев, А.В. Перова, А.В. Мандрыкин // Вестник ВГТУ: сб. науч. тр. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. – Т. 2. Вып. 13. – с. 107-113.

11 Перова А.В. Математическое моделирование показателей качества изделий / К.Ю. Гончарова // Управление качеством продукции в машиностроении и авиакосмической технике (ТМ-2018): Сб. науч. тр. X межд. науч.-техн. конф. 23-24.05.2018 / ВГТУ, Воронеж, 2018, с. 123-126.

12 Болдырев А.И. Применение метода математической статистики для определения точности обработки и шероховатости поверхностей отверстий / А.А. Болдырев, А.В. Перова, В.Н. Сухоруков // Современные технологии производства в машиностроении: сборник научных трудов. – Вып. 14. – Воронеж: «Научная книга», 2021. – с. 10-13

13 Котляр Л.М., Миназетдинов Н.М. Определение формы анода с учетом свойств электролита в задачах электрохимической размерной обработки металлов // Прикладная механика и техническая физика. – Т. 44. – 2003. № 3. – С. 179-184.

References

1 Klovov V.V. Electrochemical shaping. Kazan: Kazan University Publishing House, 1984. – 80 p.

2 Theory of electrical and physical-chemical processing methods: textbook / V.P. Smolentsev, A.I. Boldyrev, E.V. Smolentsev, G.P. Smolentsev. Voronezh: Voronezh State Technical University. 2007. – 376 p.

3 Zaitsev A.N. Electrochemical processing. Theory, technology, equipment. M.; Infra-Engineering. 2024. – 640 p.

4 Modern methods and technologies for creating and processing materials. In 3 books. / ed. V.G. Zalessky. Minsk: Physicotechnical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. – 2020. – 354 p.

5 Design of technology and equipment for electrochemical production: textbook / T.N. Ostanina [and others]. Ekaterinburg: Ural University Publishing House. 2022. – 160 p.

6 Current methods of electrochemical surface treatment / Shekhanov R.F. [and others] // News of universities. Chemistry and chemical technology. -Т. 66. – 2023. – No. 7. – P. 151-158.

7 Zhitnikov V.P., Oshmarina E.M., Fedorova G.I. The use of discontinuous functions for modeling dissolution during stationary electrochemical shaping // Izvestiya vuzov. Mathematics. –2010. – No. 10. – P. 77-81.

8 Kotlyar L.M., Minazetdinov N.M. Modeling of electrochemical shaping using a curved electrode with a stepwise dependence of the current output on its density // Applied mechanics and technical physics. T. 57. 2016. No. 1. P. 146-155.

9 Konkova O.A. Complex modeling of the electrochemical processing process // Polytechnic youth magazine. – 2016. – No. 1. – P. 1-7.

10 Boldyrev A.A. Optimization of technological processes of electrochemical processing of machine parts / A.I. Boldyrev, A.V. Perova, A.V. Mandrykin // Bulletin of VSTU: collection. scientific tr. Voronezh: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Technical University", 2017. - Т. 2. Issue. 13. – p. 107-113.

11 Perova A.V. Mathematical modeling of product quality indicators / K.Yu. Goncharova // Product quality management in mechanical engineering and aerospace engineering (TM-2018): Coll. scientific tr. X int. scientific-technical conf. 05.23-24.2018 / VSTU, Voronezh, 2018, p. 123-126.

12 Boldyrev A.I. Application of the method of mathematical statistics to determine the processing accuracy and roughness of hole surfaces / A.A. Boldyrev, A.V. Perova, V.N. Sukhorukov // Modern production technologies in mechanical engineering: collection of scientific papers. – Vol. 14. – Voronezh: "Scientific Book", 2021. – p. 10-13

13 Kotlyar L.M., Minazetdinov N.M. Determination of the anode shape taking into account the properties of the electrolyte in problems of electrochemical dimensional processing of metals // Applied mechanics and technical physics. – Т. 44. – 2003. No. 3. – P. 179-184.

© Болдырев А. А., Перова А. В., Григораш В. В.,
Падурец А. А., Болдырев А. И., 2026