

УДК 621.38

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ДЕФЕКТНОГО СЛОЯ С РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛ ЛУЧЕВОДОВ ВИБРАЦИОННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ХОНИНГОВАНИЕМ

Оборина Л.И., Трифанов И.В., Рыжов Д.Р., Исмаилов Б.Н., Берсенев С.М.

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Решетнева, Красноярск, e-mail: sibgau-uks@mail.ru

Показан метод расчета рациональных технологических параметров при последовательном удалении дефектного слоя методом электрохимической размерной обработки (ЭХРО) и абразивной механической активацией на основе обобщенной модели вибрационно-электрохимического хонингования вибрирующим катодом-инструментом с секторальной рабочей поверхностью, содержащей токопроводящие и нетокопроводящие сектора, покрытые абразивным материалом. Разработка электрохимических процессов и технологических режимов абразивной активации и анодного удаления дефектного слоя с поверхности зеркал лучеводов на финишных операциях вибрационным электрохимическим хонингованием (при вибрации и вращении катода-инструмента) является важной задачей. Разработанная модель позволяет рассчитать с применением ЭВМ профиль КИ и технологические параметры ВЭХХ в зависимости от геометрических размеров поверхности зеркала, заданных чертежом и времени обработки. Разработанные алгоритм и программа могут быть использованы для создания метода ВЭХХ зеркал лучевода и других деталей АФУ с автоматизированным управлением. Учет технологических параметров процесса позволит управлять скоростями подачи, вращения, а также и частотой вибрации КИ, напряжением на электродах, температурой и давлением подачи электролита при ВЭХХ.

Ключевые слова: вибрационное электрохимическое хонингование, электрохимическая размерная обработка, одномерная модель, вектор искоемых параметров, алгоритм, катод-инструмент с секторами рабочей поверхности

THE CALCULATION PARAMETERS OF PROCESS REMOVAL DEFECTIVE LAYER WITH SURFACE MIRRORS BY DEAM GUIDE EHRO

Oborina L.I., Trifanov I.V., Ryzhov D.R., Ismaylov B.N., Bersenev S.M.

Siberian state aerospace university M. Reshetnev, Krasnoyarsk, e-mail: sibgau-uks@mail.ru

Shows the method of calculating rational technological parameters of sequential removal of the defective layer by electrochemical machining (EHRO) and abrasive mechanical activation on the basis of a generalized model of vibration and electro-vibrating honing tool with a cathode-sectoral working surface containing conductive sector and Non-conductive coated abrasive material. Development of electrochemical processes and technological modes activation and abrasive removal of defective anode layer from the surface the mirrors on the beam guide vibratory finishing operations electrochemical honing (with vibration and rotation of the cathode – the tool is an important task. The developed model allows us to calculate by computer profile trials and technological parameters VENN depending on the geometry of the surface of the mirror, set design, and a processing time. The developed algorithm and the program can be used to create a method VENN beam guide mirrors and other parts of AGF and automated controls. Accounting for the process parameters enables you to control the feed rate of rotation, as well as the frequency of vibration of the CI, the voltage across the electrodes, temperature and supply pressure of the electrolyte in VENN.

Keywords: vibration electrochemical honing, electrochemical machining, dimensional model, the unknown vector of parameters, the algorithm, the cathode-tool with the sectors of the working surface

Разработка электрохимических процессов и технологических режимов абразивной активации и анодного удаления дефектного слоя с поверхности зеркал лучеводов на финишных операциях вибрационным электрохимическим хонингованием (ВЭХХ) (при вибрации и вращении катода-инструмента (КИ)) является важной задачей. Математически эта задача сводится к решению системы нелинейных уравнений типа

$$F(x) = y, \quad (1)$$

где x – вектор искоемых технологических параметров; y – вектор, определяющий заданную форму рефлектора зеркала; F – неявно заданное отображение, определяемое моделью процесса ЭХРО.

Изменение параметров процесса электрохимической размерной обработки (ЭХРО) в межэлектродном канале и абразивного механического удаления анодных пленок описывается системой уравнений переноса для одномерной модели в квазистатическом приближении при вибрации катода-инструмента (КИ) и его вращении с числом оборотов n с учетом влияния движения КИ на динамические характеристики электролита в межэлектродном промежутке (МЭП) и его температуру [2].

Система уравнений может включать:

1. Уравнение переноса массы:

$$\frac{d(1-\alpha) \cdot w \cdot p_{эл} \cdot a}{dx} = m_{эл} + m_{мех} - V_{Г}, \quad (2)$$

где α – газосодержание; w – объемный расход электролита; $\rho_{эл}$ – плотность электролита на входе в межэлектродный зазор; a – величина межэлектродного зазора.

Масса металла и анодных пленок, удаленных с поверхности зеркала лучевода абразивным механическим способом нетокопроводящими секторами КИ, может быть представлена выражением:

$$m_{мех} = \frac{1}{8} \cdot k \cdot \beta \cdot D^2 \cdot \mu \cdot f \cdot t_k, \quad (3)$$

где $C_{ме}$ – электрохимический эквивалент растворения металла детали; γ – удельный вес металла детали; η – выход металла по току; U – рабочее расположение; $\Delta\phi$ – сумма анодного и катодного потенциалов; χ – удельная элект-

$$m_{эл} = \frac{C_{ме}}{\gamma} \eta \frac{(U - \Delta\phi)}{a} \chi (2\pi - \beta k) \frac{D^2 n}{480} (f \cdot t_{имп}), \quad (4)$$

где β – центральный угол токоизолированного сектора с абразивным покрытием; k – количество токоизолированных секторов; D – диаметр КИ; μ – величина массы металла и анодной пленки, срезанные за 1 секунду единицей площади токоизолированного сектора с абразивным покрытием; f – частота вибрации; t_k – общее время контакта КИ и детали за 1 секунду процесса обработки.

Массу металла, аноднорстворенную при электрохимической обработке токопроводящими секторами КИ, можно рассчитать по формуле

тропроводность электролита; n – число оборотов; $t_{имп}$ – время импульса технологического тока.

Масса выделенного водорода в межэлектродном промежутке определяется из выражения:

$$V_{г} = \epsilon_n \eta_n \frac{(U - \Delta\phi)}{a} \chi \cdot (2\pi - k\beta) \frac{D^2 n}{480} t_{имп} \frac{R \cdot T_r}{M_n \cdot P_r}, \quad (5)$$

где ϵ_n – весовой электрохимический эквивалент водорода; η_n – коэффициент выхода по току при выделении водорода; R – универсальная газовая постоянная; T_r – абсолютная температура газожидкостной смеси; P_r – давление в газожидкостном слое; M_n – молекулярный вес водорода.

Уравнение переноса массы газа определим:

$$\frac{d(\alpha \cdot w \cdot p_2 \cdot a)}{dx} = V_{г}. \quad (6)$$

Время действия импульса технологического тока определяется:

$$t_{имп} \leq \frac{W \cdot C_p \cdot \rho_{эл}}{k_3 \cdot i_{ср} \cdot S_{эл.акт} \cdot U} \cdot \left(\left(\frac{1}{(1-\alpha)^b} - 1 \right) / C + (T_o - \Delta T_T) \right),$$

где C – температурный коэффициент электропроводности; b – показатель степени, обычно $b = 1,5$; T_o – температура электролита на входе в межэлектродный зазор; ΔT_T – повышение температуры электролита в межэлектродном промежутке за счет силы трения при вращении КИ; $S_{эл.акт}$ – площадь электропроводных секторов катода инструмента; k_3 – коэффициент, учитывающий ту часть мощности электрического тока, которая тратится на нагрев.

$$\Delta T_T = C_{тр} \frac{\omega^2 r_3^5}{c_p},$$

где $C_{тр}$ – коэффициент трения диска КИ о слой электролита в МЭП; ω – частота вращения КИ; C_p – теплоемкость электролита; r_3 – радиус КИ.

2. Уравнение переноса энергии:

$$\frac{d(\rho_{\chi} \cdot W \cdot C_{ра} \cdot T)}{dx} = Q_a + g_{ан} + g_k. \quad (7)$$

Плотность теплового потока за счет прохождения электрического тока и механического воздействия при вращении:

$$Q = Q_i + Q_{\omega}; \quad (8)$$

$$Q_i = \frac{\chi(U - \Delta\phi)}{a} - \text{плотность теплового}$$

потока при прохождении электрического тока, где C_p – теплоемкость электролита; T – температура электролита; Q – средняя объемная плотность теплового потока при прохождении рабочего тока через МЭП.

Где χ – удельная электропроводность электролита; U – напряжение на электродах; $\Delta\phi$ – сумма анодного и катодного потенциалов.

$$\chi = \chi_o \cdot (1 - \alpha)^B [1 + C(T - T_o)]. \quad (9)$$

Тепловые потоки с поверхности катода и анода.

$$g_{ан} = i \cdot \phi_{ан}; \quad g_k = i \cdot \phi_k; \quad (10)$$

ки, поэтому ее можно заменить следующей экстремальной задачей: найти вектор, при котором достигается величина

$$\{x; F(x) = Y\}^{\min\|x-x^0\|}, \quad (16)$$

где x_0 – вектор наиболее рациональной технологии, обеспечивающий оптимальную точность, производительность и качество поверхности. Здесь $\|x - x^0\|$ – евклидова норма вектора $x - x^0$, т.е.

$$\|x - x^0\| = \sqrt{\sum (x_i - x_i^0)^2}, \quad (17)$$

где $x_i - x_i^0$ – координаты векторов x и x^0 соответственно.

Предполагая, что функционал невязки выпуклый $\rho(x) = \|F(x) - J\|^2$, рекомендуется искать решение задачи (15) мето-

дом невязки, т.е. методом минимизации по функционалу.

$$\Phi_a(x) = \rho(x) + a\|x - x^0\|^2, \quad a > 0. \quad (18)$$

Выбор параметра регуляции a проводится по принципу невязки $\rho(x_{a_{\text{opt}}}) = \sigma^2$, где σ – уровень погрешности разностной схемы, реализующей систему дифференциальных уравнений на ЭВМ. Для минимизации функционала (17) применим метод Гаусса–Ньютона

$$x_{ak+1}^{k+1} = x_{ak}^k - \Delta a_k^k, \quad k = 0, 1, \dots \quad (19)$$

Одновременно с изменением номера итераций меняется параметр a_k . В векторном равенстве (18) вектор поправок $\Delta a_k^k = (\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n)$ является решением системы уравнений

$$(A_k^T A_k + a_k E) \Delta a_k^k = A_k^T [F(x_{ak}^k) - Y] + a_k (x_{ak}^k - x^0). \quad (20)$$

А параметр a_n измеряется по закону

$$\alpha_{k+1} \begin{cases} \rho(x_{\alpha k}^k), & \text{если } x_{\alpha k}^k \gg \sigma^2 \\ \alpha_{k-1} - \frac{\alpha_{k-1} - \alpha_k}{\rho(x_{\alpha k-1}^{k-1}) - \rho(x_{\alpha k}^k)} [\rho(x_{\alpha k}^{k-1}) - \sigma^2], & \text{если } \rho(x_{\alpha k}^k) \approx \sigma^2 \end{cases} \quad (21)$$

В формуле (15) $A_k = \frac{dF(x_{ak}^k)}{d(x_{ak}^k)}$ – матрица

частных производных в точках x_{ak}^k , вычисляемая по разностным формулам.

Система уравнений (21) решается с помощью вычислительной схемы [1], использующей перерасчеты факторизации Холецкого [3]. Итерационный процесс (20) прекращается, когда поправки для a_k и x_{ak}^k становятся достаточно малыми. С использованием дифференциальных уравнений (1)–(12) и представленного метода производился расчет параметров ВЭХХ и профиля кагода-инструмента для чистовой обработки зеркала лучевода из сплава 32 НДК. Проверка методики расчета проводилась путем расчета и экспериментального распреде-

ления съема металла для криволинейного канала, как и в работе [2]. При решении задачи формообразования необходимо было обеспечить равномерный сьем на глубину 0,2 мм дефектного слоя зеркала лучевода, полученного после механической обработки лезвийным инструментом на станке с ЧПУ. Зеркало представляло собой вырезку цилиндром $\varnothing 128$ мм из параболоида вращения:

$$Y^2 + x^2 = 4Fz; \quad (22)$$

$$z = \frac{x^2}{4F},$$

где $F = 150$ мм – фокусное расстояние.

Расчетные координаты x и z зеркала представлены в таблице.

Расчетные координаты зеркала

x , мм	242,7	252	262	272	282	292
z , мм	98,17	105,84	114,406	123,306	132,54	142,1
x , мм	300	302	312	322	332	342
z , мм	150	152,006	162,2	172,806	183,706	194,94

Отклонение рабочей поверхности зеркала от теоретической поверхности параболоида должно быть не более 0,05 мм, шероховатость поверхности $R_a \leq 0,8$ мкм. В связи с отмеченным невязка при расчете была в пределах $\pm 10^{-12}$ мм. Максимальная длина межэлектродного канала составляла 92 мм, минимальная – 70 мм. Наличие межэлектродного канала большой длины при ЭХРО обычно приводит к существенному влиянию газовыделения и перегрева электролита на равномерность съема металла по зазору и точность обработки. Для устранения указанных недостатков была разработана специальная конструкция катода-инструмента [4], метод электрохимического хонингования [5] и произведен расчет его рабочего профиля, а также параметров процесса с учетом уравнений (1)–(22) [6]. Для решения указанной задачи были разработаны алгоритм (рис. 3) и программа. Уточнение формы КИ проведено с варьированием $U, V_k, P_{вх}, \omega, f, W$, что позволило получить распределение съема по зазору металла в пределах допуска с максимальной

шероховатостью поверхности $R_a = 0,2$ мкм. Расхождение теоретических и экспериментальных данных на практике по съему в пределах 6,5–8% позволило изготовить зеркала лучеводов с размеростабильными параметрами из сплава 32 НКД с требуемой точностью и шероховатостью поверхности (отклонения поверхности от теоретической не более 0,05 мм, шероховатость $R_a = 0,16–0,2$ мкм).

Разработанная модель позволяет рассчитать с применением ЭВМ профиль КИ и технологические параметры ВЭХХ в зависимости от геометрических размеров поверхности зеркала, заданных чертежом, и времени обработки. Разработанные алгоритм и программа могут быть использованы для создания метода ВЭХХ зеркал лучевода и других деталей АФУ с автоматизированным управлением. Учет технологических параметров процесса позволит управлять скоростями подачи, вращения, а также и частотой вибрации КИ, напряжением на электродах, температурой и давлением подачи электролита при ВЭХХ.

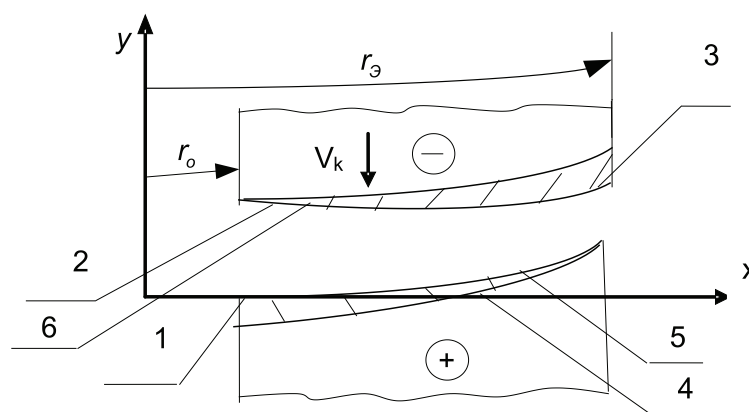


Рис. 2. Расчетная схема профиля катода-инструмента:

1 – требуемый профиль обрабатываемой поверхности по чертежу; 2 – первоначальный профиль катода-инструмента; 3 – уточненный профиль катода – инструмента; 4 – полученный профиль детали; 5 – невязка (погрешность между полученным профилем детали и требуемым по чертежу); 6 – корректировка катода-инструмента

На основании проведенных теоретических исследований разработаны обобщенная модель для расчета распределения параметров процесса снижения шероховатости по поверхности зеркала лучеводов вибрационным электрохимическим хонингованием и профиля катода-инструмента.

Определены способы решения технологической задачи путем ее замены экс-

тремальной задачей и выбором параметров регуляризации по методу невязки, т.е. минимизации по χ функционала.

Предложены методы решения дифференциальных уравнений для определения параметров формообразования при ВЭХХ, разработан алгоритм расчета профиля катода-инструмента и распределения параметров процесса по длине межэлектродного канала.



Рис. 3. Алгоритм расчета профиля катода-инструмента и распределения параметров по длине межэлектродного зазора

Список литературы

1. Бахвалов Н.С. Численные методы. – М.: Наука, 1980. – С. 12–46.
2. Трифанов И.В., Вдовенко В.Г. и др. Расчет параметров формообразования и профиля катода-инструмента при ЭХО деталей машин // Электронная обработка материалов. – 1986. – № 1. – С. 52–55.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1980. – С. 1246.
4. Пат. 2127175 Россия, 6В 23 НЗ/04, 5/06, 7/22. Катод-инструмент для размерной электрохимической обработки / И.В. Трифанов, Л.А. Бабкина (САА). – № 97109478/02: Заяв. 04.06.97: Оpubл. 10.03.99: Бюл. № 7: Приоритет 04.06.97.
5. Способ электрического хонингования: патент № 2156416 от 10.05.2001 г. / Трифанов И.В., Бабкина Л.А., Чернявский С.А.
6. Уоллис. Г. Одномерное двухфазное течение. – М.: Мир, 1972. – С. 32–50.

References

1. Boaster N.S., Numerical methods. Moscow: Nauka, 1980. pp. 12–46.
2. Trifanov I.V., Vdovenco V.G. etc. The dimensioning and shaping profile of cathode-tool at ECHO machine parts // Electronic processing of materials. 1986. no. 1. pp. 52–55.

3. Tikhonov AN, Arsenin V.Y. The methods for solving ill-posed problems. Moscow: Nauka, 1980. pp. 1246.

4. Pat. 2127175 Russia, 6B N3/04 23, 5/06, 7/22. The cathode-dimensional tool for electrochemical machining / Trifanov I.V., Babkin L.A. (CAA). no. 97109478/02: State. 06/04/97: Publ. 10.03.99: Bull. Number 7: Priority 04/06/97.

5. Trifanov I.V., Babkin L.A., Cherniavskiy S.A. The method of electric honing. Patent number 2156416 from 10.05.2001.

6. Wallis. G. The one-dimensional two-phase flow / G. Wallis. Academic Press, 1972, pp. 32–50.

Рецензенты:

Шиманский А.Ф., д.х.н., профессор, заведующий кафедрой «Композиционные материалы и физикохимия металлургических процессов», Красноярский институт цветных металлов, г. Красноярск:

Кишкин А.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Холодильная, криогенная техника и кондиционирование» Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск.

Работа поступила в редакцию 06.06.2013.