

поверхностей и откачки камеры до высокого вакуума в остаточном газе камеры и в плазмообразующем газе остается относительно большое количество химически активных газов: воды (массы 16, 17, 18), кислорода, азота, углеводородов (массы 32, 16, 28, 14, 12, 24 и др.). Большое содержание углеродсодержащих газов указывает на присутствие остатков использованных растворителей, сорбированных в резиновых уплотнителях, зазорах оснастки и в других элементах камеры.

Для уменьшения загрязнения плазмообразующей атмосферы камеры и повышения чистоты состава и свойств покрытий, потребуются дополнительные меры по очистке и обезгаживанию поверхностей камеры от остатков влаги и углеродсодержащих соединений.

Содержание компонентов остаточного газа камер в плазмообразующем газе при магнетронном напылении может значительно превышать содержание примесей в аргоне ГОСТ 10157–79 марки «высший сорт», используемом для напуска в камеру.

Для обеспечения минимального загрязнения напыляемого покрытия необходимо принимать меры по тщательной очистке и обезгаживанию поверхностей камеры от остатков влаги и углеродсодержащих соединений.

Перед началом проведения обработки напыления покрытий целесообразно проводить масс-спектрометрический контроль остаточного и плазмообразующего газов.

Библиографические ссылки

1. Холлэнд Л. Нанесение тонких пленок в вакууме : пер. с англ. М. : Госэнергоиздат. 1962.
2. Палатник Л. С., Сорокин В. К. Материаловедение в микроэлектронике. М. : Энергия, 1977.
3. ГОСТ 10157–79. Аргон газообразный и жидкий. Технические условия. М. : Изд-во стандартов, 1979.

References

1. Hollend L. *Nanesenie tonkih plenok v vakuume* (Application of thin films in a vacuum). Moscow, Gosenergoizdat, 1962, 608 p.
2. Palatnik L. S., Sorokin V. K. *Materialovedenie v mikroelektronike* (Materials Science in Microelectronics). Moscow, Energiya, 1977, 280 p.
3. GOST 10157-79. *Argon gazoobraznyi i jidkii. Tehnicheskie usloviya* (GOST 10157-79. Argon gas and a liquid. Specifications). Moscow, Izd-vo standvrtov, 1979.

© Михеев А. Е., Харламов В. А., Крючек С. Д., Черныгина А. А., Хоменко И. И., 2013

УДК 621.38

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛ ЛУЧЕВОДОВ ВИБРАЦИОННЫМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ХОНИНГОВАНИЕМ

Л. И. Оборина, И. В. Трифанов, Б. Н. Исмаилов, И. В. Стерехов, В. М. Шелковская

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: sibgau-uks@mail.ru

Показаны особенности процесса вибрационного электрохимического хонингования при удалении дефектного слоя с поверхности зеркала лучевода, изготовленного из сплава 32 НКД методом фрезерования. Малая шероховатость поверхности может быть сформирована по всей обрабатываемой поверхности за счет анодного растворения микронеровностей электрическим полем и механической активацией гребешков микронеровностей, абразивными элементами при вибрации катода инструмента.

Ключевые слова: вибрационное электрохимическое хонингование, катод-инструмент, шероховатость, импульс тока, зеркала лучевода, анодное растворение, бегущее электрическое поле.

IMPROVEMENT OF QUALITY OF MIRRORS SURFACES OF BEAM GUIDES WITH SHAKY ELECTROCHEMICAL HONING PROCESS

L. I. Oborina, I. V. Trifanov, B. N. Ismailov, I. V. Sterekhov, V. M. Shelkovsky

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: sibgau-uks@mail.ru

The authors describe the features of shaky electrochemical honing process during removal of a defective layer from a mirror surface of a beam guide made of 32 alloy by NKD method of milling. The small inequalities of a surface can be formed all over the processed surface at the expense of anode dissolution of micro inequalities by electric field and mechanical activation of combs of micro inequalities by abrasive elements at vibration of the cathode of the tool.

Keywords: shaky electrochemical honing, cathode tool, inequality, current impulse, beam guide mirror, anode dissolution, running electric field.

Лучеводная линия (ЛЛ) представляет собой систему перископических зеркал, заменяющую приемопередающую волноводную линию. К преимуществам ЛЛ относятся широкополостность, малые электрические потери, особенно на высоких частотах $f \geq 90$ ГГц, что позволяет создать многоканальные универсальные зеркальные антенны [1].

Поверхности зеркал ЛЛ могут представлять собой цилиндрические вырезки из параболоида вращения с геометрическими характеристиками:

$$y^2 + x^2 = 4Fz, \quad z = x^2 / 4F, \quad (1)$$

где F – фокусное расстояние.

Отклонение профиля рабочей поверхности рефлектора от теоретических значений не должно превышать 0,05 мм, шероховатость поверхности Ra составляет 0,16–0,2 мкм.

При решении задач формообразования зеркала лучевода, выполненного из сплава 32 НКД, со стабильными параметрами и размерами, необходимо удалить равномерно дефектный слой после механической обработки лезвийным инструментом на станке с ЧПУ на глубину до 0,2 мм с сохранением исходной точности. Для удаления дефектного слоя может быть применен метод вибрационного электрохимического хонингования (ВЭХХ) секториальным катодом – инструментом (КИ), содержащим токопроводящие и нетокопроводящие секторы на его рабочей поверхности [2]. ВЭХХ заключается в электрохимической обработке обрабатываемой поверхности бегущим импульсным током с последующей механической ее активацией при вибрации КИ и воздействии нетокопроводящими секторами, покрытыми алмазным абразивным материалом, на труднорастворимые анодные пленки [3]. В процессе ВЭХХ катод-инструмент совершает вращательное движение с числом оборотов n и одновременно вибрацию с частотой f . Удаление дефектного слоя с заготовки зеркала лучевода происходит за счет механической и электрохимической обработки бегущим электрическим полем, что позволяет устранять анодные пленки с обрабатываемой поверхности, стабилизировать потенциал анодного растворения сплава 32 НКД и достигать равномерной шероховатости поверхности во всех направлениях по рабочей поверхности.

Все металлы, анодно поляризуемые в растворах электролитов, способны переходить в ионизированное состояние по нескольким механизмам процесса анодного растворения. Предпочтительным является механизм, когда анодное растворение происходит в активном состоянии, под которым подразумевается процесс ионизации и гидратации атомов металла в рабочей среде, не осложненный проявлением пассивации. Активное анодное растворение может проходить в условиях, когда граница раздела анод–электролит освобождена от ранее образовавшихся анодных пленок. При ВЭХХ разрушение оксидных пленок осуществляется абразивным алмазным покрытием нетокопроводящих секторов КИ при его кратковременном касании с обрабатываемой поверхностью зеркала лучевода. Анодный процесс при таком механизме анодного растворения протекает по микронеровностям всей обрабатываемой поверхности. Отличительной чертой поляризационных кривых для процесса активного анодного растворения является то, что возрастание тока на поляризационной кривой начинается непосредственно от стационарного потенциала для обрабатываемого сплава (рис. 1).

Малая шероховатость поверхности формируется в процессе сглаживания неровностей и возникновения блеска на всей обрабатываемой поверхности сплава 32 НКД в основном за счет большой скорости сраствливания вершин микронеровностей по сравнению с микровпадинами из-за локализации электрических линий тока на этих микровыступах. Причина такой локализации обусловлена омическим падением электрического тока в вязкой высокоомной пленке солей, толщина которой в микровпадинах может быть больше, чем на выступах, например, при ВЭХХ в кислородосодержащем электролите 10 % NaNO_3 . Выравнивающий эффект при ВЭХХ также связан с увеличением скорости анодного растворения вершин микровыступов из-за депассивации под воздействием абразивного материала КИ, прежде всего вершин микронеровностей обрабатываемой поверхности, а также за счет равномерно распределенной плотности тока, получаемой в результате использования бегущего импульсного электрического тока по обрабатываемой поверхности и стабилизации электропроводности электролита в МЭП.

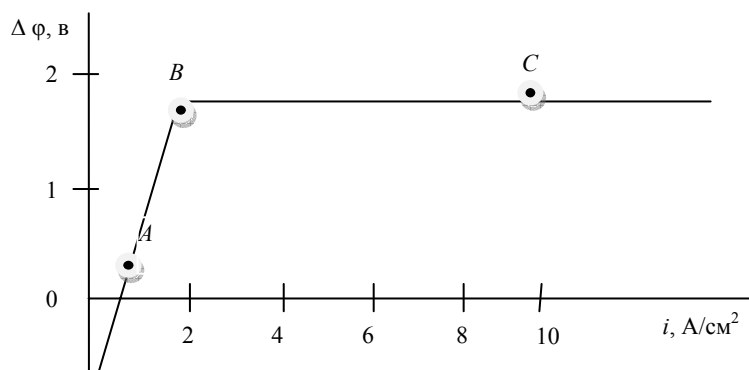


Рис. 1. Поляризационная кривая для процесса активного анодного растворения: участок AB – активное состояние; участок BC – перепассивное состояние

Новый более мелкий рельеф шероховатости поверхности образуется после завершения периода удаления окисной пленки сразу по всей обрабатываемой поверхности зеркала лучевода. Длительность процесса формирования требуемого микрорельефа обрабатываемой поверхности зависит от состава сплава, исходной шероховатости поверхности, прочности окисной пленки на нем, плотности рабочего тока, состава, температуры и скорости протока электролита, газонаполнения, а также состава продуктов анодного растворения, выбранной скорости вращения, частоты вибрации КИ, количества и размеров токопроводящих и нетокопроводящих секторов.

Важным преимуществом ВЭХХ является удаление дефектного слоя без существенного температурного и механического воздействия на обрабатываемую деталь, исключая прижоги, что дает возможность обрабатывать изделия малой жесткости толщиной 1 мм и обеспечить малые габаритно-массовые характеристики элементной базы ЛЛ. Общее количество массы металла при ВЭХХ, перешедшие в раствор электролита, будет складываться из массы, удаленной при механической обработке абразивными секторами $m_{\text{мех}}$ и растворенной при электрохимической обработке $m_{\text{эл.хим}}$ [4]:

$$m = m_{\text{мех}} + m_{\text{эл.хим}} \quad (2)$$

В свою очередь,

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

где β – центральный угол токоизолированного сектора с абразивным покрытием; k – количество токоизолированных секторов; D – диаметр КИ; μ – величина массы металла и анодной пленки, срезанных за 1 с единицей площади токоизолированного сектора с абразивным покрытием; f – частота вибрации; $t_{\text{к}}$ – общее время контакта КИ и детали за 1 с процесса обработки; t – общее время обработки зеркала лучевода.

Схема процесса ВЭХХ зеркала лучевода показана на рис. 2.

Скорость анодного растворения можно представить формулой, аналогичной формуле плоскопараллельного межэлектродного зазора, в связи с малой кривизной зеркала ЛЛ:

$$V = \frac{C_{\text{ме}}}{\gamma} \eta \frac{(U - \Delta\phi)}{\alpha} \chi, \quad (4)$$

где $C_{\text{ме}}$ – 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 электропроводность электролита; $a = a(t)$ – межэлектродный зазор;

$$\chi = \chi_0 (1 - \alpha)^B \cdot [1 + C(T - T_0)], \quad (5)$$

где α – газосодержание; χ_0 – электропроводность электролита на входе в межэлектродный зазор; B – находится экспериментально, обычно $B = 1,5$; C – температурный коэффициент электропроводности; T_0 – температура электролита на входе в межэлектродный зазор; T – температура электролита на выходе из межэлектродного зазора.

Масса металла, анодно растворенная при электрохимической обработке (формула (2)), может быть представлена выражением

$$m_{\text{эл}} = \frac{C_{\text{ме}}}{\gamma} \eta \frac{(U - \Delta\phi)}{\alpha} \chi (2\pi - \beta k) \frac{D^2 n}{480} (f \cdot t_{\text{имп}}), \quad (6)$$

где n – число оборотов КИ в минуту; $t_{\text{имп}}$ – время импульса технологического тока.

Следует учесть, что во время контакта $t_{\text{к}}$ КИ и детали, удаления металла за счет анодного растворения не происходит, так как при использовании биполярного КИ, импульс тока на обрабатываемой поверхности равен 0, а токовая нагрузка распределяется в технологическом межэлектродном зазоре 7, и короткого замыкания на обрабатываемой поверхности не происходит (рис. 2).

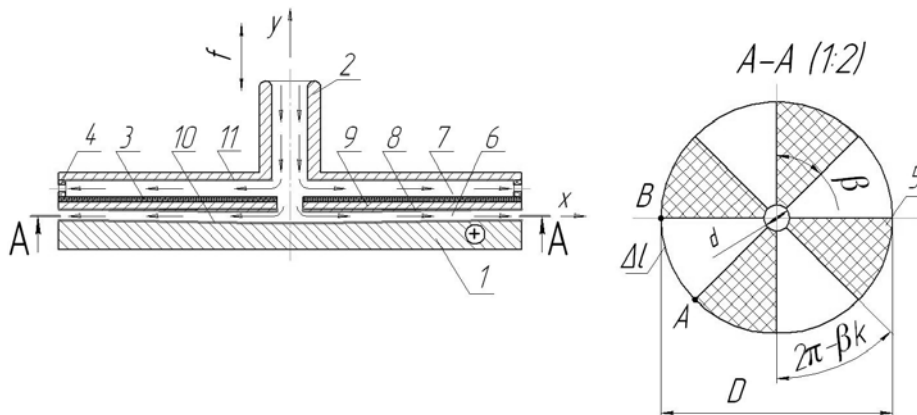


Рис. 2. Схема процесса ВЭХХ зеркала лучевода:

- 1 – обрабатываемая деталь; 2 – катод-инструмент; 3 – токопроводящий защитный слой; 4 – изолятор;
- 5 – нетокопроводящие абразивные секторы; 6 – межэлектродный зазор, изменяющийся в процессе ВЭХХ от 0 до a ;
- 7 – технологический МЭЗ; 8 – требуемый профиль обрабатываемой поверхности по чертежу; 9 – профиль катода-инструмента;
- 10 – полученный профиль детали; 11 – специальное покрытие, снижающее газовыделение водорода

Объем количества выделенного водорода на КИ в МЭП определим по формуле:

$$V_{\text{H}} = \varepsilon_{\text{H}} \eta_{\text{H}} \frac{(U - \Delta\varphi)}{\alpha} \chi (2\pi - \beta k) \times \frac{D^2 n}{480} t_{\text{имп}} \frac{R \cdot T_r}{M_{\text{H}} \cdot P_r}, \quad (7)$$

где ε_{H} – весовой электрохимический эквивалент водорода; η_{H} – коэффициент выхода по току при выделении водорода; R – универсальная газовая постоянная; T_r – абсолютная температура газожидкостной смеси; P_r – давление в газожидкостном слое; M_{H} – молекулярный вес водорода; $t_{\text{имп}}$ – длительность импульса тока в МЭП.

Содержание водорода в газожидкостной смеси можно определить по формуле [5]

$$\alpha = V_{\text{H}} / V_{\text{Д}}, \quad (8)$$

где $V_{\text{Д}}$ – объемное количество газожидкостной смеси, протекающей через зону МЭП за время $t_{\text{имп}}$, $V_{\text{Д}} = W + V_{\text{HS}}$, где $V_{\text{HS}} = f(R \cdot T_r / P_r)$ – зависимость объема водорода от температуры и давления электролита в МЭП.

Для поддержания постоянной плотности тока по всей обрабатываемой поверхности необходимо обеспечить одинаковую электропроводность электролита в МЭП, т. е. создать условие: $\chi \approx \chi_0$ по обрабатываемой поверхности.

Тогда, в соответствии с формулой (5),

$$(1 - \alpha)^B [1 + C(T - T_0)] = 1. \quad (9)$$

Температура электролита на выходе из МЭП может быть представлена:

$$T = \left[\frac{1}{(1 - \alpha)^B} - 1 \right] \frac{1}{C} + T_0.$$

Учитывая, что тепловая мощность, поступающая в МЭП при прохождении электрического тока, будет переходить в электролит, получим $N_i = k_3 \cdot i_{\text{cp}} \cdot S_{\text{эл.акт}} \times U \cdot t_{\text{имп}} = W \cdot c_p \cdot \rho_{\text{эл}} \cdot \Delta T_i$, где ΔT_i – повышение температуры электролита за счет прохождения электрического тока; k_3 – коэффициент, учитывающий ту часть мощности электрического тока, которая тратится на нагрев электролита.

Тогда:

$$t_{\text{имп}} \leq \frac{W \cdot c_p \cdot \rho_{\text{эл}}}{k_3 \cdot i_{\text{cp}} \cdot S_{\text{эл.акт}} \cdot U} \times \left[\left(\frac{1}{(1 - \alpha)^B} - 1 \right) \frac{1}{C} + (T_0 - \Delta T_T) \right], \quad (10)$$

где ΔT_T – повышение температуры электролита за счет силы трения КИ. Для сохранения электропроводности электролита в МЭП $\chi \approx \chi_0$ $t_{\text{имп}}$ может быть определено по формуле (10).

Общая масса удаленного металла (с учетом формулы (3)) может быть представлена выражением

$$m = \frac{1}{8} k \cdot \beta \cdot D^2 \cdot \mu \cdot f \cdot t_k + \frac{C_{\text{ме}}}{\gamma} \eta \frac{(U - \Delta\varphi)}{\alpha} \chi (2\pi - \beta k) \frac{D^2 n}{480} t_{\text{имп}} \cdot f. \quad (11)$$

Температуру T на выходе из межэлектродного зазора можно определить из выражения, взятого из [6].

Повышение температуры электролита увеличивает шероховатость поверхности веществ и может способствовать повышению глубины растравливания по границам зерен, поэтому ее необходимо стабилизировать в заданных пределах:

$$T = T_0 + \frac{0,24(U - \Delta\varphi) \cdot i_{\text{cp}} \cdot S_{\text{эл.акт}}}{W \cdot \rho_{\text{эл}} \cdot C_p \cdot V_a \cdot k_2} + \Delta T_T, \quad (12)$$

где i_{cp} – средняя плотность тока; k_2 – коэффициент расхода электролита, учитывающий ту часть электролита, которая участвует в переносе тепла; $S_{\text{эл.акт}}$ – площадь электропроводных секторов КИ; W – объемный расход электролита; $\rho_{\text{эл}}$ – плотность электролита; c_p – теплоемкость электролита; V_a – абсолютная скорость течения электролита в МЭП; ΔT_T – повышение температуры электролита в МЭП за счет силы трения при вращении КИ:

$$V_a = V_{\text{отн}} + V_{\text{пер}}, \quad (13)$$

где $V_{\text{отн}}$ – относительная скорость точек электролита; $V_{\text{пер}}$ – переносная скорость точек электролита.

Вращение КИ может влиять на скорость течения электролита и на повышение его температуры в МЭП, а также на динамические характеристики процесса, действующего на электролит со стороны вращающего КИ. Используя теорему о моменте количества движения, получим [7] следующее выражение:

$$M_3 = W \cdot \rho_{\text{эл}} (V_{n2} r - V_{m1} r_0), \quad (14)$$

где $m = W \rho_{\text{эл}}$ – массовый расход электролита, V_{n1} , V_{n2} – переносные скорости течения электролита на входе и выходе из МЭП; r_3 – радиус катода – инструмента; r_0 – радиус отверстия КИ для подачи электролита.

Окружная мощность вращения катода – инструмента N_3 во время цикла электрохимической обработки – определяется по формуле

$$N_3 = M_3 \omega,$$

где ω – угловая скорость.

Мощность вращения во время касания КИ с обрабатываемой поверхностью

$$N_{\text{к}} = F \cdot k_{\text{тр}} \cdot r_3 \cdot \omega = M_{\text{к}} \omega, \quad (15)$$

где F – сила прижима КИ к обрабатываемой поверхности; $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трения; $M_{\text{к}}$ – момент, действующий на катод-инструмент со стороны силы трения.

При малом осевой зазоре $a/r_3 \leq 0,2$ можно полагать, что электролит в МЭП вращается с угловой скоростью, равной половине угловой скорости диска КИ.

Коэффициент закрутки потока $\varphi = 0,5$. Тогда

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} + \rho_{\text{эл}} \omega^2 (r_3^2 - r_0^2) / 8, \quad (16)$$

где $P_{\text{вых}}$ – давление на выходе из МЭП; $P_{\text{вх}}$ – давление на входе в МЭП; ω – угловая скорость вращения КИ; $\rho_{\text{эл}}$ – плотность электролита; r_3 – радиус КИ; r_0 – радиус отверстия КИ на входе в МЭП.

Затраты мощности на трение КИ со слоем электролита в МЭП можно определить по следующей формуле [7]: $N_{\text{тр.д}} = C_{\text{тр.д}} \cdot \rho_{\text{эл}} \cdot \omega^3 \cdot r_3^5$, где $C_{\text{тр.д}}$ – коэффициент трения диска КИ о слой электролита в МЭП; $\rho_{\text{эл}}$ – плотность электролита; ω – угловая скорость вращения; r_3 – радиус КИ.

Повышение температуры электролита в МЭП за счет трения КИ: $\Delta T_T = N_{\text{тр.д}} / C_p \cdot \omega \cdot \rho_{\text{эл}}$.

Рекомендуется температуру электролита поддерживать в пределах 12–15 °С на входе в МЭП, на выходе из МЭП 25–28 °С, при ВЭХХ для обеспечения качества обрабатываемой поверхности в 10 % NaNO_3 .

В процесс ВЭХХ происходит нарастание и спад поляризации $\Delta\varphi_a$ с продолжительными временными интервалами импульс-паузы. Для обеспечения процесса локализации ВЭХХ требуется управлять динамикой поляризации в зависимости от плотности тока i , температуры электролита T в МЭП и газосодержащих α .

Необходимо также выбрать требуемые амплитудно-временные характеристики нарастания и спада поляризации $\frac{d\varphi_a}{dt} = \int_0^{t_u} \frac{di}{dt} \leq \Delta\varphi_n$, т. е. управлять электродными процессами для обеспечения активного анодного растворения и выходных параметров процесса ВЭХХ при условии $\Delta\varphi \leq \Delta\varphi_n$, где $\Delta\varphi_n$ – потенциал перепассивации.

Использование микросекундных рабочих импульсов, например 10 мс при ВЭХХ, соизмерных по длительности со временем установления электродных потенциалов, способствует повышению точности и сохранению исходной точности зеркала лучевода.

В течение действия импульса и вращения КИ влияние нагрева на электропроводность может превалировать над влиянием газонаполнения. Это, в свою очередь, способствует кратковременному повышению проводимости, позволяющей увеличению амплитудной плотности тока, что приводит к снижению высоты микронеровностей обрабатываемой поверхности до Ra 0,02–0,16 мкм и повышению степени локализации процесса до 0,015 мкм. Вибрация, вращение биполярного катода-инструмента и импульсный характер воздействия тока бегущего электрического поля на обрабатываемую поверхность с удалением анодных пленок с обрабатываемой поверхности позволяют создать начальную неэквипотенциальную поверхность, способствующую повышению точности копирования и достижению высоких плотностей тока, обеспечивающих преимущественное снижение шероховатости поверхности по микровыступам зеркала лучевода.

Подача импульсов тока синхронизирована с гармоническими колебаниями КИ таким образом, что импульс рабочего тока прямой полярности начинают пропускать в фазе $t_{\text{имп}}$ во время периода колебания. Это позволяет управлять изменением исходной электропроводности электролита за счет компенсации газовыделений в МЭП нагревом электролита при прохождении электрического тока и мощности трения КИ со слоем электролита при его вращении в МЭП.

Параметры импульса (длительность, амплитуда, фаза подачи, форма, скважность и др.) выбирают таким образом, чтобы обеспечить наибольший технологический эффект от действия рабочего импульса тока. Импульсы тока желательно обеспечить близкими к прямоугольным. В связи с отмеченным, источник технологического тока должен иметь крутопадающую вольт-амперную характеристику для создания импульсов тока, приближенных к прямоугольной форме, однако для ВЭХХ, когда пленка удаляется механическим способом, можно использовать обычный источника тока с диаграммой импульсов напряжения и тока (рис. 3).

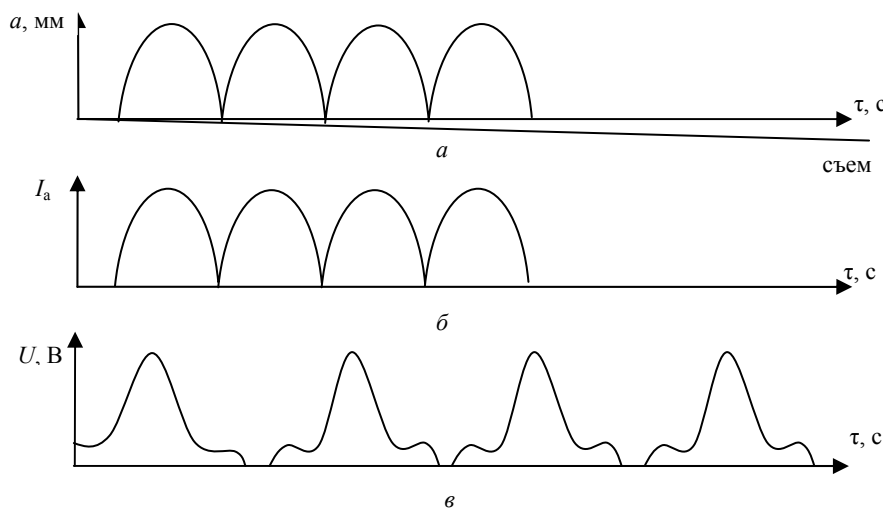


Рис. 3. Диаграммы изменения межэлектродного зазора (а), импульсов тока J_a (б) и импульсов технологического напряжения U (в)

Короткие импульсы тока управляют процессами ВЭХХ за счет временного характера развития электродных явлений. Скорость анодного растворения может составлять 0,004 г/мин, что соответствует подаче 0,05 мм/мин.

Необходимо обеспечить в процессе ВЭХХ одинаковую шероховатость поверхность во всех точках зеркала лучевода. Для этого требуется выбрать состав электролита, режимы ВЭХХ и поддерживать локальную плотность тока в интервале, где шероховатость поверхности с изменением плотности тока не изменяется, а точность обработки гарантирована в пределах установленного допуска 0,05 мм.

Допустимую среднюю плотность тока для скорости прокачки электролита 100 м/с можно определить по формуле $i_{cp} = 0,38t_{имп}U$, где i_{cp} – средняя плотность тока А/см², $t_{имп}$ – длительность импульса в мс.

На основании проведенных исследований установлено следующее:

- вращательное и одновременно вибрационное движение секториального катода-инструмента при ВЭХХ позволяет:

- осуществлять активный процесс анодного растворения микронеровностей обрабатываемого сплава за счет удаления пленок из продуктов обработки;

- подавать короткие импульсы тока синхронизировано с гармоническими колебаниями КИ, что позволяет управлять процессами ВЭХХ и исходной электропроводностью электролита за счет временного характера развития, электродных явлений;

- поддерживать локальную плотность тока по обрабатываемой поверхности в интервале, где шероховатость обрабатываемой поверхности с изменением плотности тока существенно не изменяется, а точность обработки гарантирована в пределах установленного допуска.

Библиографические ссылки

1. Бакин А. М., Оборин Л. И., Трифанов И. В. Расчет параметров двухзеркального лучевода // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 1 (41). С. 114–117.
2. Пат. РФ № 2166416. Способ электрохимического хонингования / И. В. Трифанов, Л. И. Бабкина. Оpubл. 10.05.2001.
3. Пат. РФ № 2127155. Катод-инструмент для размерной электрохимической обработки / И. В. Трифанов, Л. И. Бабкина. Оpubл. 10.03.1993.
4. Щербак Г. А., Трифанов И. В. Расчет параметров вибрационного электрохимического хонингования // Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика : сб. науч. тр. / под общ. ред. В. В. Стацурь ; ГУЦМиЗ. Красноярск, 2004. Вып. 10 (41). С. 123–126.
5. Семаков Л. А., Корчагин Г. И. К вопросу колебаний двухфазного потока в длинном межэлектродном зазоре при ЭХРО // Тр. КАИ. Казань, 1973. Ч. 1. Вып. 152. С. 59–65.
6. Моделирование процесса электрохимической размерной обработки катодом, совершающим колебательное и вибрационное движение / Г. А. Щербак, И. В. Трифанов и др. // Вестник СибГАУ. 2005. Вып. 6. С. 262–265.
7. Овсянников Б. В., Краев М. В., Черваков В. В. Теория и расчет турбомашин : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. С. 99–102.

References

1. Bakin A. M., Oborina L. I., Trifanov I. V. *Vestnik SibGAU*. 2012, № 1 (41), pp. 114–117.
2. Trifanov I. V., Babkina L. I. *Way of an electrochemical honing* (The electrowinning honing). Patent № 2166416 priority of 10.05.2001.
3. Trifanov I. V., Babkina L. I. *The cathode tool for dimensional electrochemical processing* (The cathode-dimensional tool for electrochemical machining). Patent № 2127155 priority of 10.03.1993.
4. Scherbak G. A., Trifanov I. V. *Sbornik nauchnykh trudov "Perspektivnye materialy, texnologii, konstrukcii, ekonomika"* (Collection of night works "Perspective materials, technologies, designs, economy"). GUCMiZ, Krasnoyarsk, 2004, № 10.41, pp. 123–126.
5. Semakov L. A., Korchagin G. I. *Works KAI. Kazan*, 1973, ch. 1, vol. 152, pp. 59–65.
6. Scherbak G. A., Trifanov I. V. *Vestnik SibGAU*. 2005, № 6, pp. 262–265.
7. Ovsyannikov B. V., Krayev M. V., Chervakov V. V. *Teoriya i raschet turbomashin* (Theory and Design of Turbomachinery). Krasnoyarsk, 2012, pp. 99–102.

© Оборина Л. И., Трифанов И. В., Исмаилов Б. Н., Стерехов И. В., Шелковская В. М., 2013