

УДК 621.9.047

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АНОДНО-АБРАЗИВНОМ ПОЛИРОВАНИИ КАНАЛОВ ВОЛНОВОДОВ МАЛОГО СЕЧЕНИЯ

^{1,2}Трифанов В.И., ²Суханова О.А., ²Карелина Е.А., ²Шестаков И.Я.¹ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, e-mail: sibgau-uks@mail.ru;²ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», Красноярск, e-mail: sibgau-uks@mail.ru

Рассматривается проблема снижения и выравнивания шероховатости поверхности каналов труб малого сечения анодно-абразивным полированием (ААП). Изготовление каналов труб малого сечения волочением приводит к неравномерной шероховатости поверхности в поперечном направлении $R_a = 0,24$ мкм, в продольном направлении $R_a = 0,16$ мкм, что требует снижения и выравнивания шероховатости. Предметом исследования является аналитическое определение влияния параметров анодно-абразивного полирования на снижение шероховатости поверхности каналов труб малого сечения. Анодно-абразивное полирование обрабатываемой поверхности осуществляется при совместном абразивном и анодном воздействии импульсным током на микронеровности обрабатываемой поверхности. При колебании эластичного абразивонесущего катода-инструмента (ЭАКИ), изготовленного из синтетического каучука, смешанного с абразивом электрокорунда с зернистостью 40–28 мкм, и катода, выполненного из графита, создается бегущее импульсное электрическое поле и происходит абразивное удаление оксидной пленки толщиной 0,01 мкм с микронеровностями обрабатываемой поверхности в проточном электролите 15% NaNO_3 . При этом повышается степень локализации анодного растворения микронеровностей с сохранением исходной точности канала $\pm 0,02$ мм и удалением минимального припуска. Для исследования используются схема анодно-абразивного полирования, аналитические зависимости ААП, а также формула для оценки шероховатости поверхности.

Ключевые слова: анодно-абразивное полирование, плотность тока, скважность импульсов тока, абразивное полирование

ANALYTICAL DETERMINATION OF SURFACE ROUGHNESS PARAMETERS DURING ANODIC-ABRASIVE POLISHING OF WAVEGUIDE CHANNELS OF SMALL CROSS-SECTION

^{1,2}Trifanov V.I., ²Sukhanova O.A., ²Karelina E.A., ²Shestakov I.Ya.¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: sibgau-uks@mail.ru;²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, e-mail: sibgau-uks@mail.ru

The problem of reducing and leveling the surface roughness of small-section pipe channels by anodic-abrasive polishing is considered (AAP). The production of channels of pipes of small cross-section by drawing leads to uneven surface roughness in the transverse direction $R_a = 0.24$ microns, in the longitudinal direction $R_a = 0.16$ microns, which requires reducing and leveling the roughness. The subject of the study is the analytical determination of the influence of the parameters of anodic-abrasive polishing on the reduction of the surface roughness of the channels of pipes of small cross-section. Anodic-abrasive polishing of the treated surface is carried out with the combined abrasive and anodic action of pulsed current on the micro-roughness of the surface. When an elastic abrasive-bearing cathode-tool (EACT) made of synthetic rubber mixed with an abrasive of electrocorundum with a grain size of 40–28 microns and a cathode made of graphite vibrates, a traveling pulsed electric field is created and an abrasive removal of an oxide film with a thickness of 0.01 microns with micro-dimensions of the treated surface in a flowing electrolyte of 15% NaNO_3 . At the same time, the degree of localization of the anodic dissolution of micro-dimensions increases while maintaining the initial accuracy of the channel ± 0.02 mm and removing the minimum allowance. For the study, the scheme of anodic-abrasive polishing, analytical dependences of AAP, as well as a formula for assessing surface roughness are used.

Keywords: anode-abrasive polishing, current density, current pulse duty cycle, abrasive polishing

Актуальной проблемой является снижение и выравнивание шероховатости поверхности каналов труб малого сечения после их изготовления волочением или деформирующим протягиванием.

Целью настоящей работы является получение и анализ формулы для расчета снижения и выравнивания шероховатости обрабатываемой поверхности каналов при анодно-абразивном полировании (ААП).

Материалы и методы исследования

В настоящей работе при рассмотрении уменьшения и выравнивания шероховатости поверхности анодно-абразивным полированием исследуется зависимость установившейся шероховатости в процессе анодного растворения микронеровностей бегущим импульсным электрическим током в проточном пассивирующем электролите 15% NaNO_3 , а также формирование

шероховатости поверхности за счет удаления оксидной пленки абразивными зернами эластичного абразивонесущего катода-инструмента (ЭАКИ).

На основе указанных исследований получена формула для оценки шероховатости поверхности при анодно-абразивном полировании каналов труб малого сечения, выполненных из сплава 32НХД.

Для уменьшения и выравнивания шероховатости поверхности каналов малого сечения, например 7x4 мм, 5x3 мм, может быть применен метод анодно-абразивного полирования (АПП) импульсным током [1]. Анодно-абразивное полирование [2] представляет собой совмещенный процесс анодного растворения микронеровностей под действием импульсного электрического тока в пассивирующем проточном электролите 6–15% NaNO_3 , при одновременной активации гребешков микронеровностей путем удаления пассивирующей анодной пленки толщиной 0,01–0,1 мкм абразивонесущей частью эластичного катода – инструмента (АЭКИ) путем колебания его с частотой 20–50 Гц с перемещением в продольном направлении со скоростью 60–120 мм/мин. При этом создается бегущее импульсное электрическое поле на обрабатываемой поверхности с импульсным напряжением $U(t)$ [2–4]:

$$U(t) = U_n (1 - e^{-\frac{t_u}{T_c}}), \quad (1)$$

где T_c – постоянная времени спада, с; U_n – напряжение на электродах от источников постоянного тока, В; t_u – длительность импульса напряжения, с.

Величина среднего импульса тока I_{iu} , создаваемого импульсным напряжением $U(t)$, может быть определена по формуле

$$I_{iu} = \frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} I(t) dt, \quad (2)$$

где $I(t) = I_0 e^{-(t_u/T_c)}$ – кривая тока от времени в импульсе; I_0 – максимальный ток в импульсе; T_c – постоянная времени спада тока в импульсе.

Применение импульсного тока позволяет повысить степень локализации анодного растворения микронеровностей, стабилизировать параметры электролита в межэлектродном зазоре, обеспечить сохранение исходной точности и формирование равномерной шероховатости поверхности по длине обрабатываемого канала [3].

На степень локализации при анодном растворении микронеровностей влияют различные распределения на микровыступах и микровпадинах плотности тока, выхода по току, эффективной электропроводности электролита, а также величина межэлектродного зазора. В пассивирующем электролите 15% NaNO_3 падение напряжения на микровыступах ΔU_m может составлять до 1,7 В, а на микровпадинах ΔU_d – до 2,8 В в зависимости от марки обрабатываемого материала, высоты и профиля микронеровностей, а также пассивационных процессов. Плотность тока на микровыступах и микровпадинах может отличаться в 8 раз [3]. При этом для получения требуемой шероховатости поверхности необходимо знать минимальный удаляемый припуск Z_{\min} в зависимости от исходной и конечной шероховатости поверхности. Минимальный удаляемый припуск Z_{\min} определяют по формуле

$$Z_{\min} = k_z \delta_o \ln \left(\frac{R_{ucx}}{R_k} \right), \quad (3)$$

где δ_o – начальный межэлектродный зазор, мм; R_{ucx} , R_k – соответственно исходная и конечная шероховатости поверхности, мкм, k_z – коэффициент, учитывающий механизм ААП и вид обрабатываемого материала, ($k_z = 0,1-0,15$).

Уменьшение шероховатости поверхности при анодном удалении припуска следует оценивать с учетом коэффициента локализации K_L , который зависит от условий электрохимического растворения микровыступов и микровпадин обрабатываемой поверхности.

Коэффициент локализации можно определить по формуле (4)

$$K_L = \frac{K_i \cdot d_i}{Z_{\min} dt} = \left(R_{ucx} + \frac{\eta_d \varepsilon_d}{\gamma_d} \int_0^{t_u} i_d dt - \frac{\eta_m \varepsilon_m}{\gamma_m} \int_0^{t_u} i_m dt \right) / Z_{\min} = \frac{\Delta R K_i}{Z_{\min}}, \quad (4)$$

где ε_m , ε_d – электрохимический эквивалент растворения металла на микронеровностях и во впадинах обрабатываемой поверхности; γ_m , γ_d – плотность продуктов растворения на микронеровностях и во впадинах; t_u – длительность импульса тока; i_m , i_d – плотности тока на микронеровностях и во впадинах; Z_{\min} – величина минимального удаляемого припуска; K_i – коэффициент, учитывающий условия электрохимической обработки, $K_i = 8-10$; ΔR – изменение шероховатости поверхности, $\Delta R = R_{ucx} - R_{ycm}$.

Необходимо отметить, что отношение плотностей тока i_d / i_m в процессе выравнивания шероховатости поверхности и изменения угла профиля микронеровностей может существенно изменяться и влиять на локализацию процесса анодного растворения. Высокую роль при этом играют частота и амплитуда импульсов тока S , соотношение длительности импульсов t_u и паузы t_n [4–6].

Скважность следования импульсов напряжения и тока S рассчитывают по формуле

$$S = T_u / t_n, \quad (5)$$

где T – период импульсов напряжения и тока.

Импульсы напряжения с прямым передним фронтом, что экспериментально подтверждено [7], свидетельствуют об активации гребешков микронеровностей абразивонесущей поверхностью эластичного катода-инструмента (рис. 1).



Рис. 1. Изменение импульсного напряжения $U_a = 6\text{ В}$ в межэлектродном промежутке при ААП сплава 32НХД с режимами: $A = 15\text{--}17\text{ мм}$, $f = 20\text{ Гц}$, $t_u = 3\text{ мс}$

Установившуюся шероховатость поверхности от величины снимаемого слоя металла электрохимическим способом при средней плотности тока i_c и среднем напряжении U_c на электродах, можно определить с учетом коэффициента локализации и скважности импульсов тока по формуле [8]:

$$Ra_{\text{уст}} = \frac{K_l \varepsilon_v \eta i T_0}{8 \cdot S} = K_l \frac{\varepsilon_v \eta (U_c - \Delta U) \chi \cdot 10^{-4} T_0}{8 \cdot S \cdot \delta_{\text{мэз}}}, \text{ мкм} \quad (6)$$

где U – среднее напряжение на электродах, В; ΔU – среднее падение напряжения в приэлектродных слоях, равное алгебраической сумме падений напряжений в прикатодных слоях, В; χ – удельная проводимость электролита, $1/\text{см} \cdot \text{Ом}$; $\delta_{\text{мэз}}$ – величина межэлектродного зазора, см; T_0 – время анодно-абразивной обработки, с; K_l – коэффициент

локализации процесса анодного растворения; S – скважность импульсов тока.

Удаление оксидной пленки с гребешков и активация микронеровностей обрабатываемой поверхности при ААП осуществляется абразивными зёрнами ЭАКИ, совершающим продольные колебания с амплитудой $A = 15\text{--}17\text{ мм}$, частотой $20\text{--}50\text{ Гц}$, длительностью импульсов тока $t_u = 3\text{ мс}$. Сила P_a , прижимающая зерно абразива, возникает за счет упруго-восстановительной силы эластичного абразивонесущего катода-инструмента, перемещающегося навстречу потоку электролита.

Схема процесса взаимодействия единичного зерна с микронеровностями при ААП показана на рис. 2 [9].

Мощность абразивного резания N_p можно оценить по формуле

$$N_p = M_p \cdot \omega, \text{ (Н} \cdot \text{м)/с}, \quad (7)$$

где ω – частота продольных колебаний АЭКИ, $1/\text{с}$; M_p – момент резания, $\text{Н} \cdot \text{м}$.

Момент резания M_p рассчитывался по формуле

$$M_p = P_p \cdot r, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (8)$$

где P_p – сила резания, r – радиус абразивного зерна.

Используя модель взаимодействия единичного зерна с упругопластичным материалом, силу P_p можно представить [10–12]:

$$P_p = P_a \cdot f \cdot S_u, \text{ Н}, \quad (9)$$

где P_a – сила давления на зерно, Н/мм^2 ; S_u – площадь абразивонесущего катода-инструмента; f – коэффициент трения.

Подставив выражение (9) в формулу (8), получим

$$M_p = P_a \cdot f \cdot S_u \cdot r, \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (10)$$

С учетом выражения (9) N_p согласно формуле (10) можно представить в виде

$$N_p = P_a \cdot f \cdot S_u \cdot r \cdot \omega, \text{ (Н} \cdot \text{м)/с}. \quad (11)$$

Отклонение профиля установившейся шероховатости обрабатываемой поверхности после n циклов абразивного полирования определяется по формуле

$$R_{a_{\text{уст}}} = k_y \left(\frac{h_{\text{max}} \omega}{W \cdot A} \right)^{1/2}, \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (12)$$

где h_{max} – максимальная глубина внедрения абразивного зерна в обрабатываемую поверхность, м; W – плотность распределения абразива по обрабатываемой поверхности, $1/\text{м}^2$; k_y – коэффициент, зависящий от упругопластических свойств обрабатываемой поверхности, $k_y = \sigma_T / E$; A – амплитуда колебаний абразивонесущего катода-инструмента, м.

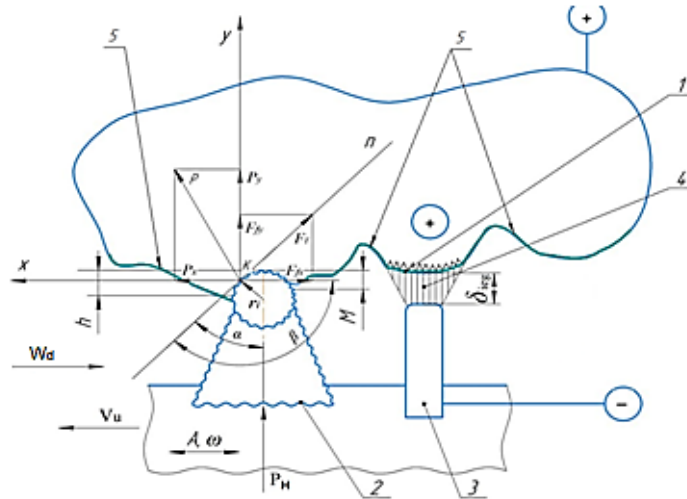


Рис. 2. Схема процесса контактного взаимодействия единичного зерна абразива и катода АЭКИ с микронеровностями обрабатываемой поверхности при ААП:

1 – микронеровности обрабатываемой поверхности; 2 – абразивное зерно эластичного абразивонесущего инструмента; 3 – катод-инструмент; 4 – силовые линии электрического поля; 5 – пассивирующая оксидная пленка; α и β – передний угол и угол резания в точке контакта К; r – радиус скругления вершины зерна; $\delta_{мэз}$ – величина межэлектродного зазора; h – глубина внедрения вершины абразивного зерна; P_a – прижимающая сила зерно абразива; F_m – сила трения; P – нормальная сила, действующая на абразивное зерно; A, ω – амплитуда и частота колебаний ЭАИ; V_u – линейная скорость перемещения ЭАИ; W_{el} – скорость прокачки электролита 15% NaNO_3

Для ААП при удалении пассивных пленок вместо h_{\max} в формуле (12) целесообразно использовать среднюю глубину $h_{\text{ср}}$ внедрения зерна за одну секунду в обрабатываемую поверхность, которую можно рассчитать по формуле для абразивонесущего АЭКИ:

$$h_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{2N_p \cdot \omega}{\pi \cdot d_3 \cdot H_v}}; \text{ м/с}, \quad (13)$$

где N_p – мощность абразивного резания микронеровностей единичного зерна, Н·м/с; H_v – твердость обрабатываемого металла по Виккерсу, МПа; d – диаметр абразивного зерна, мкм.

Подставив (13) в (12), получим формулу для расчета установившейся шероховатости в течение 1 с [10, 11]:

$$Ra_{\text{уcm}} = K_y \sqrt{\frac{\omega^2}{WA} \sqrt{\frac{2N_p \cdot \omega}{\pi \cdot d_3 \cdot H_v}}}, \text{ м/с} \quad (14)$$

или

$$Ra_{\text{уcm}} = K_y \sqrt{\frac{\omega}{WA} \sqrt{\frac{2 \cdot P_a \cdot f \cdot S_u \cdot r \cdot \omega^2}{\pi \cdot d_3 \cdot H_v}} \cdot T_0}, \text{ м}, \quad (15)$$

где T_0 – время анодно-абразивной обработки, с.

Результаты исследования и их обсуждение

С учетом формул (6), (15) можно получить формулу (16) для оценки шероховатости поверхности после ААП:

$$Ra_n = Ra_{\text{исх}} - \left[K_l \frac{\varepsilon_v \cdot \eta \cdot i}{8S} + K_y \sqrt{\frac{\omega^2}{W \cdot A} \sqrt{\frac{2P_a \cdot S_u \cdot f \cdot r}{\pi \cdot d \cdot H_v}}} \right] \cdot T_o, \text{ мкм}, \quad (16)$$

где Ra_n – установившаяся шероховатость; $Ra_{\text{исх}}$ – исходная шероховатость поверхности, см; η – выход металла по току; i – плотность тока, А/см²; ε_v – объемный электрохимический эквивалент обрабатываемого металла, см³/А*мин; k_y – коэффициент, зависящий от упруго-

пластических свойств обрабатываемой поверхности, $k_y = \sigma_T / E$; ω – частота продольных колебаний АЭКИ, 1/с; W – плотность распределения абразива АЭКИ, 1/мм²; A – амплитуда колебания АЭКИ; P_a – нормальное давление, действующее на абразивонесущую часть АЭКИ, Н/мм²; S_u – площадь абразивной части АЭКИ, мм²; f – коэффициент трения при ААП; r – радиус при вершине абразивного зерна, мм; d – диаметр абразивного зерна, мм; H_v – твердость обрабатываемого материала, Н/мм²; K_1 – коэффициент локализации процесса анодного растворения; δ – коэффициент перевода высоты выступов в параметр Ra; T_0 – время обработки, с; S – скважность импульсов тока.

Для расчета шероховатости обрабатываемой поверхности при ААП были использованы исходные данные, представленные в таблице.

Исходные данные для расчета по формуле (16) шероховатости поверхности при анодно-абразивном микрополировании каналов волноводов, выполненных из сплава 32НҚД

Электрические параметры для расчета электрохимической обработки при ААП	Механо-абразивные параметры для расчета абразивного удаления оксидной пленки при ААП
$\varepsilon_y = 0,00134 \text{ см}^3/\text{А} \cdot \text{мин};$ $A = 17 \text{ мм}; t = 30 \text{ с};$ $S = 16,63;$ электролит 15% NaNO ₃ ; $K_L = 0,09; i = 15 \text{ А/см}^2;$ $\eta = 0,4$	$H_v = 438 \text{ Н/мм}^2;$ $f_{\text{тр}} = 0,15; \omega = 20 \text{ Гц};$ $A^{\text{тр}} = 17 \text{ мм}; d = 0,040 \text{ мм};$ $T_0 = 30 \text{ с}; S_u = 216 \text{ мм}^2;$ $r_0 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ мм};$ $\dot{W} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ 1/мм}^2;$ $P_a = 5 \text{ Н/мм}^2;$ $k_y = 2,08 \cdot 10^{-3}$

Расчетная величина снимаемого припуска сплава 32НҚД при удалении оксидной пленки абразивонесущим катодом-инструментом составила 0,14 мкм. Экспериментально установлено, что исходная обрабатываемая поверхность канала из сплава 32 НҚД поперек канала была Ra_{исх} = 0,24 мкм, после ААП Ra_к = 0,12 мкм; вдоль канала была Ra_{исх} = 0,16 мкм, после ААП Ra_к = 0,10 мкм. Изменение шероховатости поверхности вдоль канала равно 0,06 мкм при средней плотности тока $i_c = 15 \text{ А/см}^2$. Изменение шероховатости по формуле (16) равно 0,0452 мкм, что составляет 25 % от измеренного значения. При выходе по току равным 0,6 при $i_c = 20 \text{ А/см}^2$ несовпадение составит 10 %. Диапазон изменения выхода по току небольшой, поэтому регулировать

шероховатость поверхности нужно плотностью тока.

Заключение

Проведен теоретический анализ анодно-абразивного полирования каналов малого сечения. Полученная формула позволяет рассчитать снижение шероховатости поверхности в зависимости от режимов и условий анодно-абразивного полирования. Наибольшее влияние на шероховатость поверхности при ААП оказывает частота продольных колебаний АЭКИ, плотность тока и выход по току. Погрешность при оценке изменения шероховатости поверхности зависит от плотности тока.

Список литературы

1. Синькевич Ю.В., Шелег В.К., Янковский И.Н., Беляев Г.Я. Электроимпульсное полирование на основе железа, хрома и никеля. Минск: БНТУ, 2014. 325 с.
2. Трифанов И.В., Оборина Л.И., Рыжов Д.Р., Сутягин А.В., Малько Л.С., Трифанов В.И. Способ анодно-абразивного полирования отверстий // Патент РФ 2588953 Патентообладатель СибГАУ. 2010. Бюл № 19.
3. Строшков В.П., Категоренко Ю.И. Электрохимическое формообразование инструмента, литейной оснастки, деталей машин: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2016. 257с.
4. Королев А.Ю., Алексеев Ю.Г., Нисс В.С., Паршута А.Э. Электролитно-плазменная обработка в управляемых импульсных режимах // Наука и техника. 2021. Т. 20. № 4. С. 279–286.
5. Любимов В.В., Полутин Ю.В., Бородин В.В. Технология и экономика электрохимической обработки / Под ред. Ф.В. Седыкина. М.: Машиностроение, 1980. 192 с.
6. Волгин В.М., Сидоров В.Н., Кабанова Т.Б., Давыдов А.Д. Влияние формы импульсов напряжения на электрохимическую обработку // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 10. С. 611–618.
7. Трифанов В.И., Карелина Е.А., Суханова О.А., Трифанов И.В. Исследование параметров процесса анодно-абразивного полирования каналов малого сечения // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 11. С. 79–86.
8. Надарана Ц.Г., Бабкина Л.А., Шестаков И.Я. Электрохимическое полирование металлов в водных растворах нейтральных солей с вибрацией электрода: монография. Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет, 2014. 117 с.
9. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 319 с.
10. Димов Ю.В. Обработка деталей эластичным инструментом: справочник. Иркутск: Издательство Иркутского государственного технического университета, 2013. 484 с.
11. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Верченко А.В., Коханюк А.Г. Обеспечение шероховатости поверхности детали при гидроабразивной резке заготовок из стали // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XXVI международной научно-технической конференции (Донецк – Севастополь, 23–29 сентября 2019 г.). Донецк – Севастополь: Донецкий национальный технический университет, 2019. С. 398–401.
12. Силы и мощность резания. [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/3978301/page:9/> (дата обращения: 05.05.2022).