

УДК 620.16(075.8)

Контроль металлических поверхностей, обработанных алмазным наноточением, по работе выхода электрона

Шаронов Г.В.¹, Жарин А.Л.², Мухуров Н.И.³, Пантелеев К.В.²

¹Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета, ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Беларусь

³Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, пр. Независимости, 68, 220072, Минск, Беларусь

Поступила 22.09.2015

Принята к печати 05.11.2015

Технология размерной обработки резанием базируется на использовании интегральных геометрических параметров поверхности твердого тела. Технологическое воздействие резца приводит к процессам окисления и изменению физико-химических параметров поверхности. Для описания характеристик обработки и формирования сверхгладких поверхностей контроль геометрических параметров оказывается недостаточным. Поэтому используется параметр работа выхода электрона. Целью работы являлось исследование электрофизического состояния оптических поверхностей цветных металлов и сплавов в совокупности с геометрическими и физико-химическими параметрами по распределению работы выхода электрона поверхности. Исследование проводилось на экспериментальных образцах из меди и алюминиевого сплава, обработанных по технологии алмазного наноточения. Технология алмазного наноточения позволяет обеспечить шероховатость обработки цветных металлов и сплавов на уровне $R_a \leq 0,005$ мкм. В качестве метода регистрации изменений по поверхности работы выхода электрона использовался модернизированный зонд Кельвина. Определена зависимость величины работы выхода электрона и ее изменение от физико-химических и геометрических параметров поверхности. Показано, что технология алмазного наноточения позволяет получать электрофизически однородные оптические поверхности на меди и алюминиевом сплаве с минимальным разбросом распределения по поверхности электропотенциала.

Ключевые слова: пористый анодный оксид алюминия, алмазное наноточение, поверхность, шероховатость, работа выхода электрона.

Адрес для переписки:

Пантелеев К.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Беларусь
e-mail: nil_pt@bntu.by

Address for correspondence:

Pantsialeveu K.U.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimisty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: nil_pt@bntu.by

Для цитирования:

Шаронов Г.В., Жарин А.Л., Мухуров Н.И., Пантелеев К.В.
Контроль металлических поверхностей, обработанных алмазным наноточением, по работе выхода электрона
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 196–203

For citation:

Sharonov G.V., Zharin A.L., Muhurov N.I., Pantsialeveu K.U.
Control of metal surfaces machined in accordance with the diamond nanomachining technology based on the electron work function
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 196–203

Введение

В настоящее время методы, основанные на регистрации распределения работы выхода электрона (РВЭ), например по контактной разности потенциалов, находят достаточно широкое применение для исследований и неразрушающего контроля параметров поверхности, и процессов, протекающих в поверхностных и приповерхностных слоях твердых тел [1–3]. Величина РВЭ связана напрямую с физико-химическими и механическими свойствами вещества в конденсированном состоянии. Изменение физико-химических и механических параметров поверхности твердого тела должно вызывать соответствующее изменение РВЭ [2]. Существующая технология размерной обработки резанием базируется на известных теориях обработки с использованием интегральных параметров поверхностного слоя, например, значением R_{max} – максимальной высоты шероховатости [4]. Как показывает практика, при обработке и формировании сверхгладких поверхностей цветных металлов и сплавов свободные электроны, образующиеся при технологическом воздействии резца, приводят к процессам окисления поверхности и изменению физико-химических параметров [5]. При этом толщина образующейся оксидной пленки может быть сравнима или больше высоты максимальной шероховатости. При описании характеристик реальной поверхности металлов после обработки недостаточно оперировать только геометрическими параметрами. Необходимо учитывать также все виды неоднородности, присущие металлам: физическую, химическую и индуцированную. Неоднородность поверхности, вызванная воздействием резца в процессе обработки, существенно влияет на распределение электронов в металле и приводит к эффектам эмиссии электронов и сглаживанию электронной плотности. Согласно электронной теории металлов, энергия электронов будет тем ниже, чем более гладкой и однородной является поверхность с электронами. Для исследования шероховатой поверхности металлов и сплавов используется параметр РВЭ поверхности [6], так как он наиболее чувствителен к процессам, протекающим в поверхностных и приповерхностных слоях твердого тела при внешних физических воздействиях (пластическая деформация, окисление, фазовые и структурные превращения, распределение поверхностных и подповерхностных дефектов и т.п. [1–3, 7]). Поэтому величина РВЭ может быть принята в качестве комплексного па-

раметра оценки физико-химического состояния поверхности при обработке и формировании оптических чистых поверхностей [8].

Целью работы являлось исследование электрофизического состояния оптических поверхностей цветных металлов и сплавов в совокупности с геометрическими и физико-химическими параметрами по распределению РВЭ поверхности.

Метод исследования

Регистрация распределения РВЭ осуществлялась модернизированным зондом Кельвина [9]. Метод заключается в измерении контактной разности потенциалов между поверхностями контролируемого образца и эталонным измерительным электродом. Величина контактной разности потенциалов определяется разностью работ выхода электрона поверхностей образованного плоского конденсатора. Измерительный зонд выполнен из материала с относительно стабильной работой выхода электрона (в нашем случае из никеля). Поэтому для перехода от регистрируемой величины контактной разности потенциалов к относительной величине РВЭ необходимо знак измеренных показаний изменить на противоположный. Отличительной особенностью методики исследования является бесконтактность, отсутствие каких-либо разрушающих воздействий на контролируемый образец и возможность выявления дефектов структуры, недоступных другим неразрушающим, в частности, оптическим и электронным методам контроля.

Измерения выполняли на сканирующей установке [1]. В состав установки входят следующие основные узлы: двухкоординатный привод перемещения рабочего столика; блок управления и сбора данных, выполненного на базе стандартного ПК; вибрирующий зонд Кельвина–Зисмана. Привод позволяет проводить перемещение рабочего столика с закрепленным на нем образцом линейными размерами до 180×180 мм, шагом сканирования от 10 мкм. Регистрация контактной разности потенциалов осуществлялась в диапазоне ± 5 мВ и разрешающей способностью 250 мкм. Случайные ошибки измерения сведены к нулю [10].

Технология изготовления экспериментальных образцов металлических подложек с оптической чистотой поверхности

Для алмазного наноточения используется специальное высокоточное оборудование, позволяю-

щее обеспечить шероховатость обработки цветных металлов и сплавов на уровне $R_a \leq 0,005$ мкм. Из бескислородной меди МО, как правило, изготавливаются зеркала для мощных технологических CO₂-лазеров и теплоотводы для мощных полупроводниковых лазеров. Из алюминиевого сплава марки 5086 США (4,0 % Mg, 0,5 % Mn) изготавливаются подложки для получения пористого анодного оксида алюминия для гибридных микросхем, а из сплава АМГ-2 – оптические зеркала широкого практического применения [11]. Технология изготовления экспериментальных образцов подложек включает предварительную токарную или фрезерную обработку с последующим нагревом для стабилизации фазового и структурного состояния материала, снятия внутренних напряжений, оптимизации сопротивления пластическим деформациям.

Суперфинишная обработка поверхности подложек проводится на базе прецизионного токарного станка модели МК 6501 с вертикальным расположением шпинделя. Во избежание влияния внешних колебаний станок имеет виброизолирующие пневмоопоры и устанавливается на бетонной подушке толщиной 70 мм непосредственно на земле. Шпиндель станка расположен с зазором в радиально-упорном аэростатическом подшипнике. Точение деталей осуществляется на выбеге за счет кинетической энергии шпинделя, предварительно раскрученного асинхронным двигателем. Для перемещения суппорта в процессе обработки используется пневмогидравлический привод.

В качестве инструмента использовался специально разработанный резец из монокристаллического синтетического алмаза СТМ «Алмазот» (ТУ РБ 40007852.010-2004) с радиусной заточкой режущей кромки. Особенности процесса резания алмазными резцами определяются физико-механическими свойствами и структурой алмазов: низким коэффициентом трения по обрабатываемым материалам, высокими значениями тепло- и температуропроводности, обеспечивающими сравнительно низкие температуры в зоне резания. Это позволяет проводить обработку на высоких скоростях резания.

Для изготовления алмазных резцов использовались специально отобранные кристаллы алмаза (СТМ «Алмазот») октаэдрической формы весом порядка 1 карата с низким уровнем внутренних напряжений. Параметры станка: точность позиционирования суппорта, радиальное и осевое биение шпинделя, погрешность линейного перемещения

суппорта должны быть не хуже 100 нм. Алмазное наноточение происходит на уровне кристаллической решетки, и деформация зерен материала практически отсутствует, поэтому радиус заострения режущей кромки резца должен быть соизмерим с размерами кристаллической решетки материала изделия и молекул поверхностно-активных веществ (ПАВ), т.е. порядка 0,1–0,5 мкм. Необходимость применения ПАВ обусловлена требованием получить высокое качество рабочей поверхности $R_a \leq 0,005$ мкм при максимальном оптическом коэффициенте отражения. Обычно в качестве ПАВ используют этиловый спирт. Попадая в зону резания, спирт интенсивно испаряется, что приводит к охлаждению резца и изделия. В результате возникает обратный эффект – укорочение резца вследствие его охлаждения, что при правильном выборе скорости и положения попадания струи спирта в зону резания приводит к компенсации тепловых деформаций алмаза вследствие нагрева в зоне резания. При алмазном точении в случае отсутствия ПАВ такого качества поверхности достигнуть не удастся, хотя точность формы изделия может быть получена достаточно высокая.

Обрабатываемые изделия, как правило, по 2 единицы для балансировки, крепились на вакуумной планшайбе, закрепленной на шпинделе и предварительно отбалансированной. Скорость вращения шпинделя на воздушном подшипнике 2000 об/мин. Обработка резцом ведется за один проход глубиной не более 0,01 мм со скоростью подачи резца 10 мм/мин. В процессе обработки осуществляется визуальный контроль поверхности. Обработку проводят в несколько циклов до тех пор, пока не будут выведены все видимые дефекты на зеркальной поверхности изделия.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ распределения РВЭ прецизионных поверхностей позволяет выявить неоднородность их электрофизических свойств, отражающую распределение дефектов поверхности. Зарегистрированная величина разброса электростатического потенциала по поверхности будет свидетельствовать об неоднородности электрофизических свойств поверхности. Характеристики экспериментальных образцов и результаты измерения относительных изменений РВЭ по их поверхности представлены в таблице.

Таблица / Table

Результаты измерения относительного значения работы выхода электрона
Measuring results of relative value of electron work function

№ образца № sample	Характеристика образцов Sample parameters	U_1 , мэВ meV	U_2 , мэВ meV	ΔU
1	Пористый анодный оксид алюминия (ПАОА), диаметр 100 мм, толщина 1,5 мм Sample of porous anodic alumina (PAOA) having a diameter of 100 mm and thickness of 1,5 mm	60	125	65
2	Алюминий АМГ-2, класс чистоты 10, диаметр 100 мм, толщина 1,5 мм Aluminium AMG-2 sample having a purity grade of 10, diameter of 100 mm and thickness of 1,5 mm	-300	-250	50
3	Алюминий АМГ-2, класс чистоты 14, диаметр 100 мм, толщина 1,5 мм Aluminium AMG-2 sample having a purity grade of 14, diameter of 100 mm and thickness of 1,5	-265	240	25
4	ПАОА с гальваническим наноалмазным покрытием, диаметр 50 мм, толщина 10 мм Aluminium sample PAOA with nanodiamond galvanic coating sample having a diameter of 50 mm and thickness of 10 mm	0	45	45
5	Алюминий АМГ-2, класс чистоты 14, линейные размеры 100 × 50 × 7 мм Aluminium AMG-2 sample having a purity grade of 14, 100 × 50 × 7 mm	-295	-290	5
6	Алюминиевая подложка АМГ-2, класс чистоты 10, линейные размеры 100 × 50 × 7 мм Aluminium AMG-2 sample having a purity grade of 10, 100 × 50 × 7 mm	-295	-270	25
7	Медь М2, класс чистоты 13, линейные размеры 30 × 25 × 2 мм Copper M2 sample having a purity grade of 14, 30 × 25 × 2 mm	-5	5	10
8	Медь М2, класс чистоты 12, диаметр 25 мм, толщина 10 мм Copper M2 sample having a purity grade of 13, having a diameter of 25 mm and thickness of 10 mm	-20	5	25

Как видно из приведенных результатов, относительное максимальное значение РВЭ 125 мВ и изменение электропотенциала по поверхности $\Delta U = 65$ мВ имеет алюминий ПАОА, образец № 1. Визуализированные изображения электропотенциального рельефа поверхности исследуемых образцов представлены на рисунке 1.

Электропотенциальное изображение поверхности диска пористого анодного оксида алюминия с гальванически нанесенным наноалмазным

покрытием (образец № 4) приведено на рисунке 1d. На визуализированном изображении видны неоднородности электрофизических свойств поверхности, проявляющаяся в изменении значений потенциала. По сравнению с образцом № 1 ПАОА (рисунок 1a) распределение электропотенциала более однородно, максимально зарегистрированная энергия выхода электрона составляла 45 мВ, а изменение электропотенциала по поверхности $\Delta U = 45$ мВ.

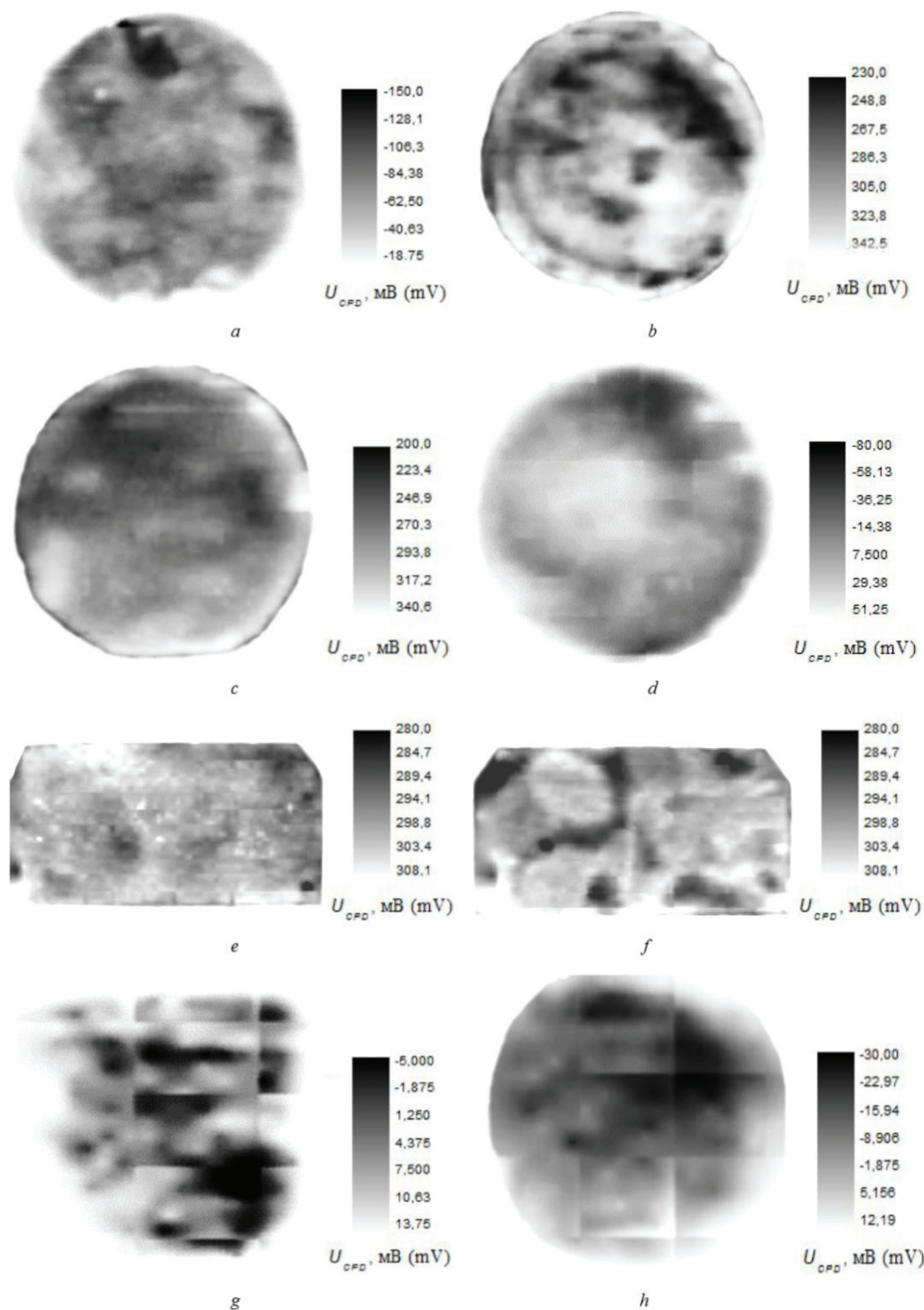


Рисунок 4 – Эле́ктропотенциальные изображения поверхности экспериментальных образцов: *a–h* – соответственно образцы 1–8

Figure 4 – Electric potential images of the surface of experimental samples: *a–h* are samples 1–8, respectively

Из полученных изображений распределения РВЭ можно сделать вывод о степени неоднородности поверхностей пористого анодного оксидного слоя и влияния на характер распределения РВЭ гальванически нанесенного наноалмазного покры-

тия. Подложки из алюминиевого сплава, образцы № 2, 3, 5, 6 (рисунок 1*b*, 1*c*, 1*e*, 1*f*) имеют минимальные значения РВЭ –300 мВ, –265 мВ, –295 мВ и –295 мВ соответственно, причем она не зависит от класса чистоты обработки поверхности, что

противоречит часто встречающемуся в литературе утверждению, чем поверхность более гладкая, тем работа выхода электрона меньше. Полученные результаты говорят о другом. Класс чистоты, шероховатость и электрофизическую однородность поверхности характеризует не только численное значение РВЭ, но в значительной степени изменение электропотенциала по поверхности ΔU . На рисунке 1*h* приведены электропотенциальное изображение образца медной марки М2 с 12 классом чистоты, на рисунках 1*e* и 1*g* приведены электропотенциальные изображения поверхностей подложек из алюминиевого сплава АМГ-2 (образец № 5) и медной марки М2 (образец № 7) соответственно, обработанных по технологии алмазного наноточения с классом чистоты не хуже 14. Зарегистрированный разброс значений РВЭ у образцов № 5 и № 7 имел минимальные значения 5 мВ и 10 мВ соответственно, что говорит о высоком уровне электрофизической однородности поверхностного слоя достигаемой за счет технологии алмазного наноточения.

Заключение

Проведенные исследования показали, что при наноразмерной обработке металлической поверхности, в том числе и по технологии алмазного наноточения, работа выхода электрона и ее изменение по поверхности характеризуют ее физико-химическое состояние и в совокупности с ее геометрическими характеристиками, прежде всего шероховатостью, позволяют в полной мере контролировать достижение заданных эксплуатационных характеристик обрабатываемых изделий, задавать и оптимизировать технологические режимы процесса обработки.

При наноразмерной алмазной обработке алюминиевого сплава АМГ-2 получена высокая электрофизическая однородность поверхностного слоя с минимальным значением РВЭ и минимальным разбросом электропотенциала по поверхности на уровне $\Delta U = 5$ мВ.

Использование технологии алмазного наноточения с последующим анодным оксидированием с нанесением наноалмазного покрытия позволяет получить однородный теплопроводящий материал. Предложенная методика контроля электрофизического состояния может быть использована для производства электронных изделий на основе пористого анодного оксида алюминия с повышенными энергетическими характеристиками, где тре-

буется для отвода тепла, монтажа и изготовления печатных плат высокопрочный теплопроводящий материал: светодиодные осветительные системы, гибридные интегральные микросхемы, полупроводниковые лазеры, тиристоры, транзисторы и др.

Список использованных источников

1. Zharin, A.L. Contact Potential Difference Techniques As Probing Tools in Tribology and Surface Mapping / A.L. Zharin // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology. – Heidelberg : Springer-Verlag, 2010. – P. 687–720.
2. Жарин, А.Л. Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии / А.Л. Жарин. – Минск : Изд-во Беспринт, 1996. – С. 235.
3. Жарин, А.Л. Методы зондовой электрометрии для разработки и исследования свойств перспективных материалов / А.Л. Жарин // Перспективные материалы и технологии: монография : в 2 т. / А.Л. Жарин, К.В. Пантелеев, А.К. Тявловский. – Витебск : Изд-во ВГТУ, 2015. – Т. 1. – 398 с.
4. Predicting surface roughness in machining: a review / P.G. Benardos, G.-C. Vosniakos // Int. J. of Machine Tools and Manufacture. – 2003. – Vol. 43, № 8. – P. 833–844.
5. On the correlation between surface roughness and work function in copper / W. Li, D.Y. Li // J. Chem. Phys. – 2005. – Vol. 122, № 6. – P. 81–86.
6. Назаров, Ю.Ф. Методы исследования и контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов / Ю.Ф. Назаров, А.М. Шкилько, В.В. Тихоненко, И.В. Компанец // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – Т. 5. – № 3–4. – С. 206–216.
7. Диагностика локальных изменений пластической деформации по работе выхода электрона / К.В. Пантелеев, А.И. Свистун, А.Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2015. – № 1 (10). – С. 56–63.
8. Анализ способов обработки поверхностно-пластическим деформированием / А.В. Ежелев, И.Н. Бобровский, А.А. Лукьянов // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6–3. – С. 642–646.
9. Zharin, A.L. Application Macro- and Micro Kelvin Probe in Tribological Studies / A.L. Zharin // Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap between the Macro- and Micro/Nanoscales. – Netherland : Kluwer Academic Publishers, 2001. – P. 445–466.
10. Tyavlovsky, A.K. Kelvin probe error compensation based on harmonic analysis of measurement signal / A.K. Tyavlovsky and et al. // Przegląd Elektrotechniczny, 2014. – No. 3. – P. 251–254.
11. Ультрафиолетовые детекторы на основе эпитаксиальных алмазных пленок, выращенных на монокристаллических алмазных подложках методом газозаводного синтеза / Г.В. Шаронов [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2010. – Т. 76, № 5. – С. 714–719.

Control of metal surfaces machined in accordance with the diamond nanomachining technology based on the electron work function

Sharonov G.V.¹, Zharin A.L.², Muhurov N.I.³, Pantsialeveu K.U.²

¹A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Kurchatova St., 7, 220045, Minsk, Belarus

²Belarusian National Technical University, Nezavisimisty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus

³B.I. Stepanove Institute of Physic of National Academy of Science, Nezavisimisty Ave., 68, 220072, Minsk, Belarus

Received 22.09.2015

Accepted for publication 05.11.2015

Abstract. Dimensional machining technology is based on the use of integrated geometric parameters of machined surfaces. Technological impact of a pick results in oxidation processes and changes in physic-chemical parameters of surface. Control of only geometric parameters is insufficient to describe characteristics of machining and formation of ultra-smooth surfaces. The electron work function is therefore used. The aim of the work was to study electrophysical states of optic surfaces of non-ferrous metals and alloys in relation to geometric and physic-chemical parameters according to the distribution of the electron work function over the surface. We conducted the study on experimental metal samples made of copper and aluminum alloy, machined in accordance with the diamond nanomachining technology. The diamond nanomachining technology would be capable of ensuring the roughness of non-ferrous metals and alloys machined at the level of $R_a \leq 0,005 \mu\text{m}$. Modernized Kelvin probe was used as the registration technique of the changes of the electron work function over the surface. Dependence between the electron work function value, as well as its alteration and the physic-chemical and geometric parameters of a surface has been determined. It has been shown that the diamond nanomachining technology makes it possible to obtain electro-physically uniform optical surfaces on copper and aluminum alloy with the minimal range of the distribution of the electric potential over the surface.

Keywords: porous anodic alumina, diamond nanomachining, surface, roughness, electron work function.

Адрес для переписки:

Пантелеев К.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Беларусь
e-mail: nil_pt@bntu.by

Address for correspondence:

Pantsialeveu K.U.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimisty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: nil_pt@bntu.by

Для цитирования:

Шаронов Г.В., Жарин А.Л., Мухуров Н.И., Пантелеев К.В.
Контроль металлических поверхностей, обработанных алмазным
наноочением, по работе выхода электрона
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 196–203

For citation:

Sharonov G.V., Zharin A.L., Muhurov N.I., Pantsialeveu K.U.
Control of metal surfaces machined in accordance with the diamond
nanomachining technology based on the electron work function
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 196–203

References

1. Zharin A.L. Contact Potential Difference Techniques As Probing Tools in Tribology and Surface Mapping. *Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology*, Heidelberg, Springer-Verlag, 2010, pp. 687–720.
2. Zharin A.L. *Metod kontaktnoj raznosti potentsialov i yego primeneniye v tribologii* [Method of contact potential difference and its application in tribology]. Minsk, Best-print Publ., 1996, 235 p. (in Russian).
3. Zharin A.L., Pantsialeyeu K.U., Tyavlovski A.K. [Methods probe electrometry for the development and study of the properties of advanced materials] *Perspektivnye materialy i tekhnologii: monografija* [Perspective materials and technologies: a monograph. In 2 Volumes]. Vitebsk, VSTU, vol. 2, 398 p. (in Russian).
4. Benardos P.G., Vosniakos G.-C. Predicting surface roughness in machining: a review. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43, no. 8, pp. 833–844.
5. Li W., Li D.Y. On the correlation between surface roughness and work function in copper. *J. Chem. Phys.*, 2005, vol. 122, no. 6, pp. 81–86.
6. Nazarov Yu.F., Shkilko A.M., Tihonenko V.V., Kompaneec I.V. Metals and alloys surface roughness investigation and control methods. *Physical Surface Engineering*, 2007, vol. 5, no 3–4, pp. 206–216.
7. Pantsialeyeu K.V., Svistun A.I., Zharin A.L. Methods for local changes in the plastic deformation diagnostics on the work function. *Devices and Methods of Measurements*, 2015, vol. 10, no. 1, pp. 56–63.
8. Ezhelev A.V., Bobrowski I.N., Lukyanov A.A. Analysis of processing ways by superficial and plastic deformation. *Fundamental Research*, 2012, no. 6–3, pp. 642–646.
9. Zharin A.L. Application Macro- and Micro Kelvin Probe in Tribological Studies. *Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap between the Macro- and Micro/Nanoscales*, Netherland, Kliwer Academic Publishers, 2001, pp. 445–466.
10. Tyavlovsky A.K. Kelvin Probe error compensation based in harmonic analysis of measurement signal / A.K. Tyavlovsky and et al. / *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014. – No. 3. – P. 251–254.
11. Sharonov G.V., Bolshakov A.P., Ralchenko V.G., Kazuchits N.M., Petrov S.A. Ultraviolet detectors based on epitaxial diamond films grown on single-crystal diamond substrate by chemical vapor deposition. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2010, vol. 76, no. 5, pp. 658–662.