

- системы в экономике. Учебник, -5-е изд. – М. Издательство – Торговая корпорация «Дашков и К<sup>о</sup>». – 2008. – 395 с.
14. Жданов А.А. Автономный искусственный интеллект. 2-е изд. – М.: Бином. Лаборатория знаний. – 2009. – 359 с.
  15. Кудрявцев В.Б., Гасанов Э.Э., Подколзин А.С. Введение в теорию интеллектуальных систем: Учебное пособие. – М.: Издательский отдел факультета ВМ и К МГУ им. М.В. Ломоносова. – МАКС Пресс. – 2006. – 208 с.
  16. Браверман Э.М., Мучник И.Б. Структурные методы обработки эмпирических данных. – М.: «Наука», Главная редакция физико-математической литературы. – 1983. – 459 с.
  17. Гаскаров Д.В. Интеллектуальные информационные системы. – М. Высшая школа. – 2003. – 431 с.
  18. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике, Часть 20: Изобретение компьютера и информационной сети Интернет // Электротехника и электромеханика. – №3. – 2014. – С. 3-13.
  19. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Интеллектуальные информационные системы. – М.: Финансы и статистика. – 2004. – 424 с.
  20. Гаврилов А.В. Гибридные интеллектуальные системы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2002. – 142с.

УДК 620.16(075.8)

### КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ОБРАБОТАННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ АЛМАЗНОГО НАНОТОЧЕНИЯ, ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА

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

<sup>1</sup>*Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко  
Минск, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

<sup>3</sup>*Институт физики НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь*

В настоящей работе проведены исследования распределения работы выхода электрона (РВЭ) и определена его связь с физико-химическими и геометрическими параметрами оптической металлической поверхности, обработанной по технологии алмазного наноточения. Приводятся также результаты по измерению РВЭ оксидированной поверхности, предварительно обработанной по технологии алмазного наноточения.

Существующая технология размерной обработки резанием базируется на известных теориях обработки с использованием интегральных параметров поверхностного слоя, например, значением  $R_{max}$  – максимальной высоты шероховатости. 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. При этом толщина образующейся оксидной пленки может быть сравнима или больше высоты максимальной шероховатости. Таким образом при описании характеристик реальной поверхности металлов после обработки недостаточно оперировать только геометрическими параметрами. Необходимо учитывать также все виды неоднородности, присущие металлам: физическую, химическую и индуциро-

ванную. 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. Основным вклад в формирование потенциального рельефа металлических поверхностей вносит РВЭ. Параметр РВЭ наиболее чувствителен к изменениям структуры, химического состава, различным дефектам в поверхностном слое [1]. Поэтому отклонение по поверхности величины РВЭ может быть принято в качестве комплексного параметра оценки физико-химического состояния поверхности.

Для экспериментальных исследований использовалась установка для контроля гомогенности прецизионных поверхностей, разработанная в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ [2]. Для регистрации РВЭ был использован компенсационный метод, известный также как метод Кельвина-Зисмана. Его физический принцип заключается в измерении контактной разности потенциалов (КРП) между поверхностями контролируемого образца и зонда, изготовленного из материала с относительно стабильной РВЭ.

Для алмазного наноточения используется спе-

циальное высокоточное оборудование, позволяющее обеспечить шероховатость обработки на уровне  $Ra \leq 0,005$  мкм [3]. Для изготовления экспериментальных подложек использовался алюминиевый сплав марки АМГ-2. В процессе фрезерования для стабилизации фазового и структурного состояния материала, снятие внутренних напряжений и оптимизации сопротивления пластическим деформациям проводился стабилизирующий нагрев заготовок. Суперфинишная обработка проводилась на базе прецизионного токарного станка модели МК 6501 с вертикальным расположением шпинделя на воздушном подшипнике. При точении алмазный резец перемещается по траектории, соответствующей осевому сечению обрабатываемой поверхности, поэтому траектория движения должна соответствовать расчетной траектории с точностью до 0,1 мкм. Параметры станка: точность позиционирования суппорта, радиальное и осевое биение шпинделя, погрешность линейного перемещения суппорта - 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, т.е. порядка 0,1 – 0,5 мкм. Необходимость применения ПАВ обусловлена требованием получить высокое качество рабочей поверхности  $Ra \leq 0,005$  мкм при коэффициенте оптического отражения  $\geq 0,9$ . При алмазном наноточении в случае отсутствия ПАВ такого качества поверхности достигнуть не удастся, хотя точность формы изделия может быть получена достаточно высокой. Обрабатываемые подложки с линейными размерами 100x50x7 мм по 2 ед. крепились на вакуумной планшайбе, закрепленной на шпинделе. 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 подложки. Обработку проводят в несколько циклов до тех пор, пока не будут выведены все видимые дефекты на зеркальной поверхности подложки.

На рисунках 1 и 2 приведены электропотенциальные изображения поверхности подложек из алюминиевого сплава АМГ-2, обработанных по технологии алмазного наноточения с классом чистоты 14 и 10-ый соответственно. Следует отметить, что для перехода от регистрируемой величины КРП к РВЭ измеренной относительно РВЭ эталонной поверхности зонда, необходимо знак показаний изменить на противоположный.



Рисунок 1 – Электропотенциальное изображение распределения РВЭ поверхности алюминиевого сплава АМГ-2, обработанной по технологии алмазного наноточения, класс чистоты 14

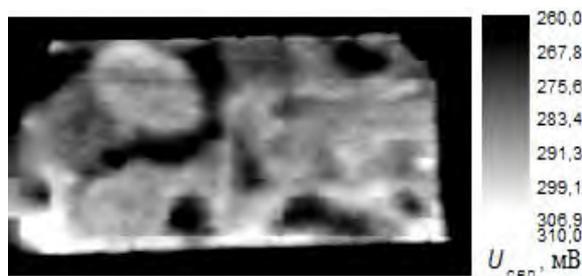


Рисунок 2 – Электропотенциальное изображение распределения РВЭ поверхности алюминиевого сплава АМГ-2, обработанной по технологии алмазного наноточения, класс чистоты 10

На рисунках 1 и 2 видно, что оба образца имеют одинаковое минимальное значение РВЭ (-295 мэВ), при том, что класс обработки поверхности был разный, соответственно 14 и 10-ый. Полученные результаты несколько противоречат, часто встречающемуся в литературе утверждению, что чем поверхность более гладкая, тем РВЭ меньше. Как видно из полученных результатов – класс чистоты, шероховатость и электрофизическую однородность поверхности характеризует не только численное значение РВЭ, но в значительной степени изменение по поверхности электропотенциала  $\Delta U$ . У подложки, обработанной по технологии алмазного наноточения с 14 классом чистоты, изменение электропотенциала по поверхности составило  $\Delta U = 10$  мВ, а у подложки с 10 классом чистоты соответственно  $\Delta U = 35$  мВ. На рисунке 3 для сравнения приведено электропотенциальное изображение распределения РВЭ поверхности оксидированной подложки из алюминиевого сплава АМГ-2, предварительно обработанного по технологии алмазного наноточения.

На рисунке 3 видны неоднородности электрофизических свойств оксидированной поверхности, проявляющиеся в росте значений РВЭ до 124 мэВ при изменении электропотенциала по поверхности до  $\Delta U = 76$  мВ, что значительно превосходит значение РВЭ поверхности у алюминиевой подложки, обработанной по технологии алмазного наноточения (рисунки 1, 2).

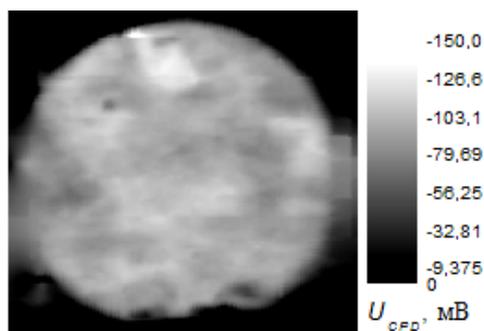


Рисунок 3 – Электростатическое изображение распределения РВЭ оксидированной поверхности сплава АМГ-2, предварительно обработанной по технологии алмазного наноточения

Таким образом, при наноразмерной обработке металлической поверхности РВЭ и изменение ее распределения по поверхности, характеризуют физико-химическое состояние и геометрические характеристики, прежде всего шероховатость, и позволяет в полной мере контролировать дости-

жение заданных эксплуатационных параметров обрабатываемых изделий и, тем самым, задавать и оптимизировать технологические режимы процесса обработки.

1. Zharin A.L. Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping // Applied Scanning Probe Methods. – 2010. – М.14. – Р. 687-720
2. Методы зондовой электрометрии для разработки и исследовании свойств перспективных материалов // Перспективные материалы и технологии: монография. В 2 т. / А.Л. Жарин [и др.]; Витебск: УО «ВГТУ». – Т. 1. – 2015. – 398 с.
3. Шаронов Г.В., Гусев В.С. Наноразмерная обработка поверхности из цветных металлов и сплавов для изделий оптоэлектронной техники // Сборн. докл. 5-ой междунар. научн.-техн. конфер. «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ-2012»; г. Минск. – 2012. – С. 394-395.

УДК 51-73

### ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПОЛЕВЫХ КАТОДОВ НА ИХ АВТОЭЛЕКТРОННУЮ ЭМИССИЮ

Шелухин К.А.<sup>1</sup>, Козлова Т.А.<sup>1</sup>, Горох Г.Г.<sup>2</sup>, Хатько В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет радиоэлектроники и информатики

Минск, Республика Беларусь

Автоэмиссионные свойства катода из графита определяются в основном параметрами микровыступов на его эмитирующей поверхности. Поэтому при изучении эмиссионных свойств автокатодов различных типов сопоставляются автоэмиссионные свойства и структура поверхности. Под шероховатостью понимается величина, обратная среднему радиусу закругления микровыступа, формирующего поверхность авто-катада. Кроме этого, эффективным методом улучшения эмиссионных свойств является тренировка (формовка) автокатада. Отмечено, что после формовки микроструктура рабочей поверхности, а следовательно, и стабильность эмиссионного тока релаксирует к некоторому оптимальному значению, которое определяется микроструктурой исходного материала, рабочей площадью, требуемым токоотбором и расстоянием анод-катод.

Дальнейшее развитие тонкопленочных катодов связано прежде всего с уменьшением их геометрических размеров и увеличением плотности упаковки, что позволяет достигнуть сразу нескольких целей. Уменьшение расстояния

острие – управляющий электрод и радиуса острия понижает рабочее напряжение. Одновременно снижаются требования к вакууму, поскольку уменьшается вероятность ионизации и энергия ионов, бомбардирующих катод. Увеличение плотности упаковки эмиттеров увеличивает среднюю плотность тока, которую способен обеспечить автоэмиссионный катод. Увеличивается также предельная рабочая частота приборов, созданных на основе технологии тонкопленочных катодов.

Эмиттером в случае исследования и применений ПЭЭ обычно является острие и эмиссия идет с близкой по форме к полусфере вершины острия. Поэтому кажутся логически оправданным применение модели сферического диода и использование сферической симметрии при решении задач о ПЭЭ.

Процесс полевой электронной эмиссии электронов из металла в вакуум достаточно хорошо описывается уравнением Фаулера-Нордгейма

$$j(E) = \frac{AE^2}{\Phi t^2(y)} \exp\left(-B \frac{\Phi^{3/2}}{E} v(y)\right)$$