

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING

УДК 620.16(075.8):681.7.026.3
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-351-357>

Поступила в редакцию 28.09.2017
Received 28.09.2017

Г. В. Шаронов¹, Г. А. Гусаков¹, А. Л. Жарин², А. К. Тявловский², Н. И. Мухуров³

*¹Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко
Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь
²Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь
³Государственное научно-производственное объединение
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь*

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗЕРКАЛ-ОТРАЖАТЕЛЕЙ
ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА**

Аннотация. В настоящее время технология алмазного лезвийного точения с наноразмерной шероховатостью широко используется при изготовлении металлооптических изделий, прежде всего зеркал-отражателей для «транспортировки» мощных лазерных энергетических потоков. Оптимальным материалом для зеркал-отражателей представляется алюминиевый сплав АМг2, на чистоту поверхности которого при суперфинишной обработке алмазным точением влияет качество предварительной механо-термической обработки. Целью работы являлось улучшение оптических характеристик зеркал-отражателей с высокой лучевой прочностью путем совершенствования технологии изготовления и контроля качества.

Предварительная механическая обработка поверхности твердосплавным резцом и финишная обработка алмазным резцом (с радиусом закругления лезвия менее 0,05 мкм) проводились на прецизионном токарном станке модели МК 6501 с вертикальным расположением шпинделя на воздушном подшипнике. Термическая обработка осуществлялась в лабораторной электропечи марки SNOL 58/350. Были апробированы различные режимы предварительной термической обработки, обработки твердосплавным резцом и финишной обработки алмазным резцом подложек (20×20×7 мм³). Анализ состояния поверхности проводился с использованием микротвердомера ПМТ-3, атомно-силового микроскопа (АСМ) SolverPro P47 и экспериментальной установки зондовой электрометрии. Контроль электрофизических параметров поверхности осуществлялся путем регистрации распределения работы выхода электрона (РВЭ) по контактной разности потенциалов с обработкой микропроцессорным измерительным преобразователем электростатических потенциалов. Регистрируемые изменения РВЭ характеризуют физико-химические и механические параметры поверхности зеркал и указывают на наличие различного типа и природы дефектов.

Модифицированная предварительная механо-термическая обработка позволила улучшить чистоту обработки поверхности подложек. Финишная наноразмерная алмазная лезвийная обработка, включающая полное удаление нарушенного предыдущими операциями поверхностного слоя материала, приводила к максимально возможному повышению качества поверхности по параметру однородности распределения ее электрофизических свойств. В результате по значениям РВЭ и их изменениям контролировалось достижение заданных эксплуатационных характеристик поверхности изделий для оптимизации технологических режимов обработки в соответствии с функциональными назначениями формируемых приборов и устройств.

Разработаны методики повышения эффективности наноразмерной алмазной лезвийной обработки и проведения исследований электрофизических свойств поверхности по контролю дефектов при изготовлении металлических зеркал-отражателей с высокой отражательной способностью и лучевой прочностью для работы в экстремальных условиях.

Ключевые слова: зеркала-отражатели, оптические характеристики, технология изготовления, контроль качества

Для цитирования: Совершенствование технологии изготовления и контроля качества зеркал-отражателей из алюминиевого сплава / Г. В. Шаронов [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 3. – С. 351–357. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-351-357>

G. V. Sharonov¹, G. A. Gusakov¹, A. L. Zharin², A. K. Tyavlovskii², N. I. Mukhurov³¹A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus²Belarussian National Technical University, Minsk, Belarus³State Scientific and Production Association "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk, Belarus

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF MANUFACTURING AND CONTROL OF QUALITY OF MIRRORS-REFLECTORS FROM ALUMINUM ALLOY

Abstract. At present, the technology of diamond blade whetting with nano-sized roughness is widely used at the manufacturing of metal-optical products, first of all, mirror-reflectors for "transportation" of powerful laser energy flows. Optimum material for mirror-reflectors is an aluminum alloy AMg2, which surface purity, is affected by the quality of preliminary mechanical heat treatment during superfinishing treatment by diamond whetting.

Preliminary machining of the surface with a carbide cutter and finishing with a diamond cutter (with a radius of curvature of the blade less than 0.05 μm) were performed on a precision lathe of the MK 6501 model with a vertical spindle position on an air bearing. Thermal treatment was carried out in the laboratory electric furnace SNOL 58/350. Various modes of preliminary heat treatment, machining with a carbide cutter and finishing with a diamond cutter of substrates (20×20×7 mm³) were tested. The surface state analysis was carried out using the PMT-3 microhardness tester, the SolverPro P47 atomic-force microscope (AFM), and the experimental probe-electrometry device. The control of the electrophysical parameters of the surface was carried out by recording the distribution of the electron work function (RWF) by the contact potential difference with the processing by the microprocessor measuring transducer of electrostatic potentials. The recorded changes in the RWF characterize the physic-chemical and mechanical parameters of the surface of mirrors and indicate the presence of a different type and nature of defects.

Modified preliminary mechanical-thermal treatment allowed to improve the cleanliness of surface treatment of substrates. Finishing nanoscale diamond blade processing, including the complete removal of the surface layer that was disturbed by previous operations, bring to the greatest possible improvement in the quality of the surface in terms of the uniformity of the distribution of its electrophysical properties. As a result, according to the values and changes of the RWF, achievement of the specified performance characteristics of the product surface was monitored in order to optimize the technological processing modes in accordance with the functional designations of the devices.

The methods for increasing the efficiency of nanoscale diamond blade processing and performing researches of the electrophysical properties of the surface to control defects in the manufacture of metal reflector mirrors with high reflectivity and radiation strength for operation under extreme conditions.

Keywords: mirror-reflectors, optical characteristics, manufacturing technology, quality control

For citation. Sharonov G. V., Gusakov G. A., Zharin A. L., Tyavlovskii A. K., Mukhurov N. I. Improvement of technology of manufacturing and control of quality of mirrors-reflectors from aluminium alloy. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 351–357 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-351-357>

Введение. В настоящее время технология алмазного лезвийного точения с наноразмерной шероховатостью широко используется при изготовлении металлооптических изделий, в первую очередь зеркал-отражателей для транспортировки мощных лазерных энергетических потоков. К металлам при изготовлении зеркал-отражателей с высокой лучевой прочностью предъявляются жесткие требования: минимальные значения физической, химической и индуцированной неоднородности; отсутствие внутренних напряжений; хорошая полируемость; высокая отражательная способность; высокая теплопроводность и минимальный коэффициент линейного расширения. Неоднородности структуры поверхности, остаточные внутренние напряжения, температурные деформации, присущие металлам, могут существенно сказаться на оптических и эксплуатационных характеристиках зеркал. Как показывает практика, оптимальным материалом для изготовления зеркал-отражателей является алюминиевый сплав АМг2, несмотря на его высокий коэффициент линейного расширения. Этот сплав широко используется на практике при изготовлении различных изделий методами холодного прессования, штамповки и обработки с использованием режущего инструмента. Режимы термообработки данного материала, позволяющие повысить его пластичность перед обработкой давлением, а также режимы, снимающие остаточные напряжения после формовки и придающие готовому изделию требуемое сочетание прочности и пластичности, хорошо известны [1]. Вместе с тем влияние предварительной механо-термической обработки сплава АМг2 на чистоту поверхности при суперфинишной обработке алмазным точением при изготовлении зеркал-отражателей с высокой лучевой прочностью изучено недостаточно.

С целью улучшения оптических характеристик зеркал-отражателей с высокой лучевой прочностью в представленной работе исследуются технологические процессы по предварительной

механо-термической и финишной алмазной лезвийной обработке поверхности подложек из алюминиевого сплава АМг2 и приводятся результаты контроля качества зеркал методами зондовой электрометрии (МЗЭ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Особенности механо-термической обработки поверхности подложек из сплава АМг2.

При отработке технологических процессов для стабилизации фазового и структурного состояния поверхности подложек из алюминиевого сплава АМг2 проводилась механическая и термическая обработка. Предварительная механическая обработка поверхности твердосплавным резцом и финишная – алмазным резцом (с радиусом закругления лезвия $\leq 0,05$ мкм) осуществлялись на прецизионном токарном станке модели МК 6501 с вертикальным расположением шпинделя на воздушном подшипнике. Термическая обработка осуществлялась в лабораторной электропечи марки SNOL 58/350. В процессе изготовления экспериментальных образцов подложек (габаритные размеры $20 \times 20 \times 7$ мм³) были исследованы следующие режимы предварительной термической обработки:

режим 1 (образец № 1) – исходный сплав АМг2;

режим 2 (образец № 2) – гомогенизация при $T = 200$ °С в течение 10 ч с последующим охлаждением на воздухе;

режим 3 (образец № 3) – гомогенизация при $T = 200$ °С в течение 10 ч с последующим охлаждением на воздухе, обработка твердосплавным резцом, нагрев при $T = 100$ °С в течение 6 ч с последующим охлаждением на воздухе;

режим 4 (образец № 4) – гомогенизация при $T = 200$ °С в течение 10 ч с последующим охлаждением на воздухе, два цикла обработки твердосплавным резцом и нагрева при $T = 100$ °С в течение 6 ч с последующим охлаждением на воздухе.

После термических воздействий все образцы дополнительно обрабатывались алмазным резцом.

Анализ состояния поверхности проводился с использованием микротвердомера ПМТ-3, атомно-силового микроскопа (АСМ) SolverPro P47 и экспериментальной установки зондовой электрометрии [2].

На рис. 1 приведены зависимости микротвердости от нагрузки для всех исследованных образцов. Измерения для каждого образца проводились дважды – после термообработки и после финишной обработки алмазным резцом. Исходный сплав находился в «нагартованном» состоянии, поэтому для него наблюдалось заметное снижение микротвердости с ростом нагрузки. Гомогенизирующий отжиг при $T = 200$ °С (режим № 2), как и ожидалось, обуславливал разупрочнение поверхности исходного сплава. Обработка гомогенизированного образца твердосплавным резцом с последующим возвратом к $T = 100$ °С приводила к заметному упрочнению его поверхности. Наблюдалось существенное увеличение наклона нагрузочных кривых. Рост микротвердости при малых нагрузках для образца № 4 превосходил в 2 раза соответствующие значения для образца № 2.

В результате финишной обработки алмазным резцом микротвердость всех исследованных образцов снижалась, что отражалось на уменьшении угла наклона зависимости микротвердости от нагрузки. Это говорит о том, что при алмазном точении происходило удаление поверхностных дефектов, созданных предыдущими обработками, и структура поверхностного слоя материала становилась более однородной. Наиболее четко этот эффект проявлялся для образца № 4.

На рис. 2 приведены результаты исследования рельефа поверхности образцов № 1–4 методом АСМ при поле сканирования 10×10 мкм². Зарегистрированные значения R_z составили соответственно: образец № 1 – 3,1 нм, № 2 – 1,6 нм, № 3 – 1,4 нм, № 4 – 1,1 нм. Видно, что предварительная механо-термическая обработка (режимы № 3 и № 4) позволяет улучшить чистоту обработки поверхности алюминиевых сплавов.

Полученные результаты механо-термической обработки подложек образцов № 3 и № 4 были использованы при изготовлении зеркал-отражателей из алюминиевого сплава АМг2 диаметром 100 мм и толщиной 7,5 мм.

Важным фактором в этом случае является контроль фазового и структурного совершенства поверхностного слоя, наличия инородных включений, внутренних напряжений, пластических деформаций и т. д. Как показывает практика, физико-химические характеристики состояния поверхности могут влиять на эксплуатационные свойства зеркал в большей степени, чем геоме-

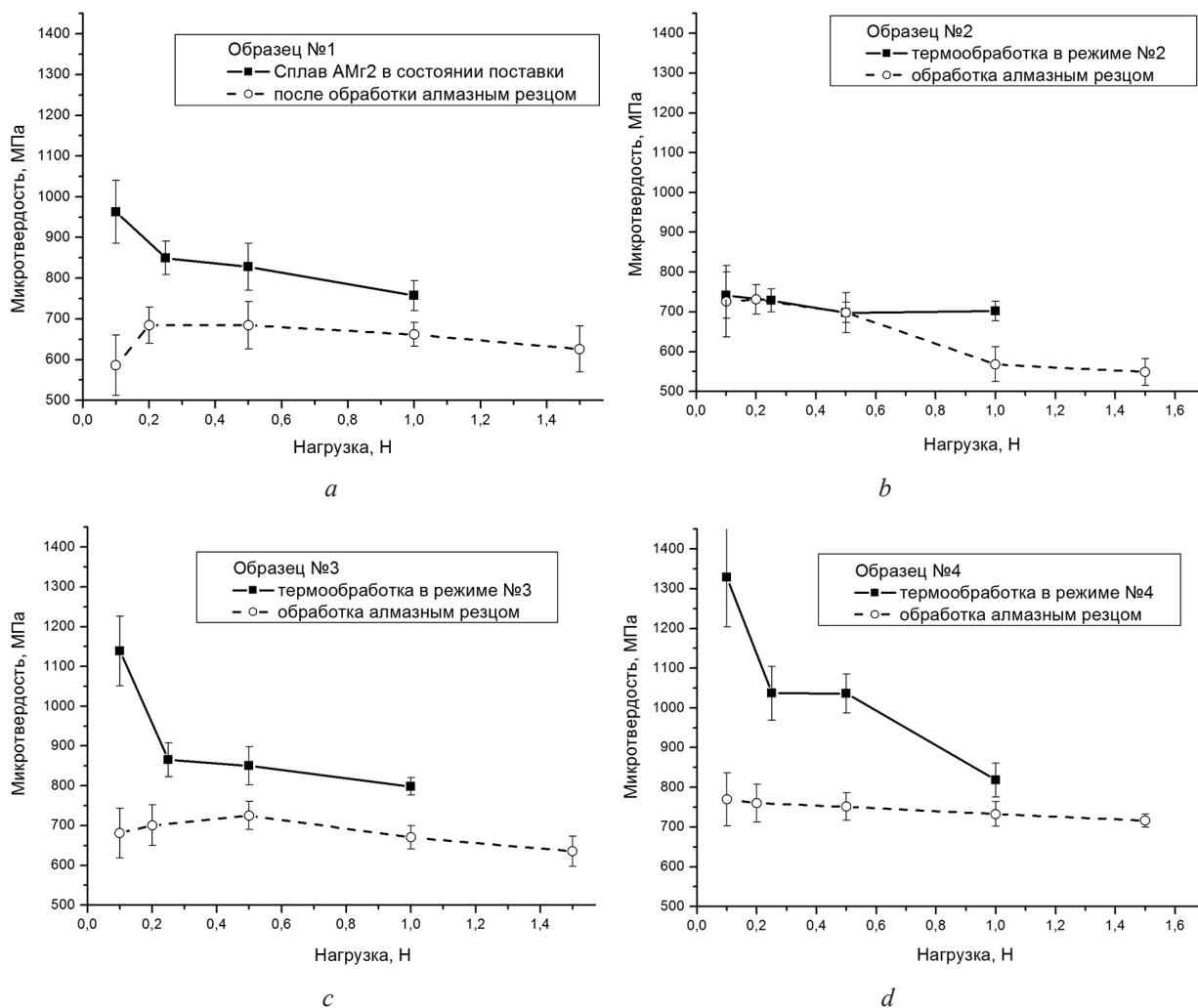


Рис. 1. Зависимости микротвердостей от нагрузки после обработки алмазным резцом для исследованных образцов: *a* – исходный АМг2; *b*, *c*, *d* – после термообработки в режимах № 2–4 соответственно

Fig. 1. Dependences of microhardnesses on the diamond cutter processing for the test samples: *a* – initial alloy АМг2; *b*, *c*, *d* – heat treatment in modes No. 2–4 respectively

трические параметры (шероховатость, волнистость). Поэтому при оценке качества поверхности зеркал-отражателей необходимо учитывать два фактора: шероховатость и работу выхода электрона (РВЭ), так как РВЭ наиболее чувствительна и свидетельствует об изменении структуры, химического состава и других нарушений в поверхностном слое. Данные факторы могут быть приняты в качестве комплексных параметров оценки физико-химического состояния и качества обработки поверхности зеркал-отражателей.

Оценка качества поверхности подложек методом контактной разности потенциалов. Оценка физико-химического состояния экспериментальных образцов зеркал-отражателей измерения РВЭ проводилась методом зондовой электрометрии по контактной разности потенциалов (КРП) с использованием зонда Кельвина [3]. Физико-химические и структурные параметры поверхности зеркал-отражателей, влияющие на оптические свойства, соответствуют изменениям РВЭ. Регистрация данных изменений осуществлялась с помощью микропроцессорного измерительного преобразователя электростатических потенциалов, реализующего сканирующий режим измерения [3, 4]. В основу работы преобразователя положен метод измерения КРП, известный как метод Кельвина – Зисмана. Методика экспериментальных исследований включала в себя создание визуализированного изображения пространственного распределения КРП по поверхности образцов с использованием результатов сканирования, гистограммы распределения значений КРП и определение статистических характеристик распределения, таких как математическое ожидание значений КРП и полуширина гистограммы распределения.

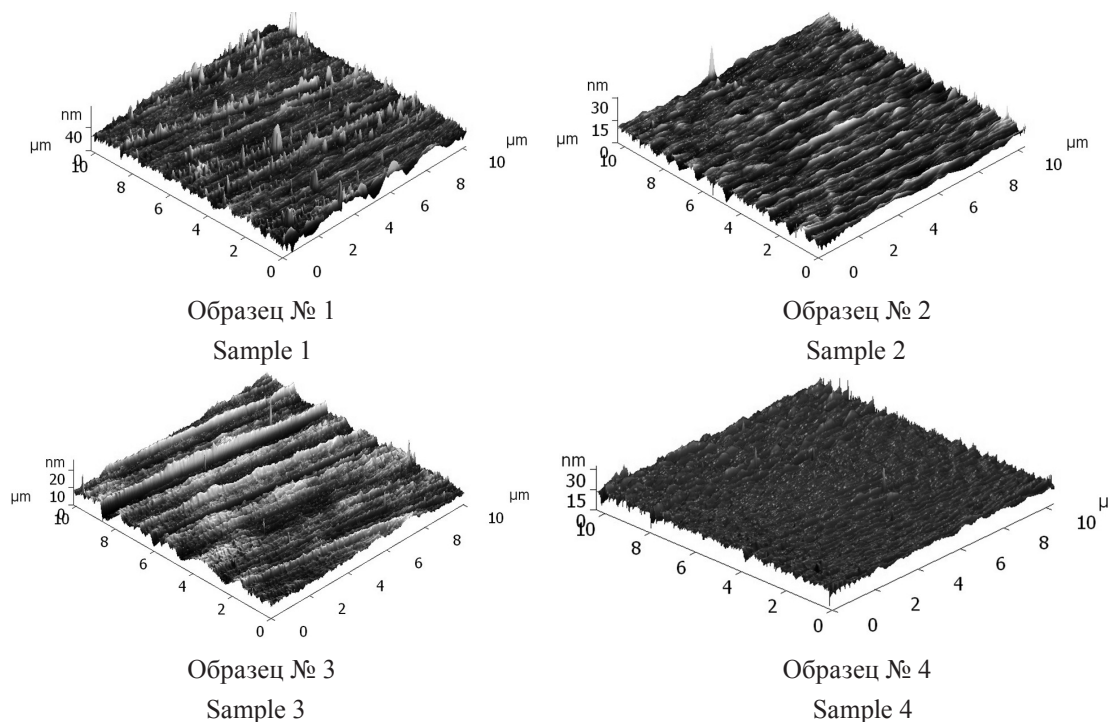


Рис. 2. Изображения рельефа поверхности образцов после финишной обработки алмазным резцом при поле сканирования $10 \times 10 \text{ мкм}^2$ и измеренные значения шероховатости при различных полях сканирования.

Шероховатость поверхности Rz при площади скана: $10 \times 10 \text{ мкм}^2/50 \times 50 \text{ мкм}^2$, № 1 – $3,1/(4,2 \pm 1,1) \text{ нм}$, № 2 – $1,6/(3,8 \pm 0,7) \text{ нм}$, № 3 – $1,4/(2,7 \pm 0,5) \text{ нм}$, № 4 – $1,1/(3,2 \pm 1,0) \text{ нм}$

Fig. 2. Images of the surface relief of samples after finishing with a diamond cutter with a scanning field of $10 \times 10 \text{ }\mu\text{m}^2$ and measured roughness values for different scanning fields Roughness of the surface Rz at the scan area: $10 \times 10 \text{ }\mu\text{m}^2/50 \times 50 \text{ }\mu\text{m}^2$: No. 1 – $3.1/(4.2 \pm 1.1) \text{ nm}$, No. 2 – $1.6/(3.8 \pm 0.7) \text{ nm}$, No. 3 – $1.4/(2.7 \pm 0.5) \text{ nm}$, No. 4 – $1.1/(3.2 \pm 1.0) \text{ nm}$

На рис. 3 приведены визуализированные изображения и гистограммы распределения КРП центральной области $20 \times 20 \text{ мм}^2$ оптической поверхности экспериментальных образцов зеркал-отражателей, прошедших механо-термическую обработку по режимам № 3 и № 4. Можно видеть, что финишная наноразмерная алмазная лезвийная обработка, включающая полное удаление нарушенного предыдущими операциями поверхностного слоя материала, приводила к максимально возможному повышению качества поверхности по параметру однородности распределения ее электрофизических свойств.

Как видно из изображений распределения КРП образцов № 3 и № 4, поверхности в целом не содержат каких-либо дефектов, фон изображения распределения КРП абсолютно однородный, а разброс КРП не превысил $\pm 4 \text{ мВ}$. При этом уровень шумов измерительного преобразователя электропотенциалов оценивается на уровне $\pm 2 \text{ мВ}$. Зарегистрированные значения электропотенциалов соответствуют измеренной шероховатости поверхности контрольных образцов подложек $Rz \leq 1,2 \text{ нм}$. Это говорит о высокой электрофизической и структурной однородности поверхности и может служить критерием разбраковки металлических зеркал по классу чистоты.

Как показывают проведенные нами исследования, существующие критерии оценки класса чистоты оптических деталей с использованием оптической лупы или микроскопа применительно к металлооптическим изделиям, изготовленным по технологии алмазного наноточения, не совсем достоверны, так как не могут достаточно полно отразить все механические и структурные дефекты, присущие металлическим поверхностям. Поэтому для повышения достоверности оценки дефектности поверхности зеркал-отражателей и их физико-химического состояния необходимо учитывать такой комплексный параметр, как величина работы выхода электрона, а карты распределения КРП будут объективно отражать тот или иной класс чистоты поверхности.

Анализ ранее проведенных работ по классификации изображений, выявленных на визуализированной карте [5–7], показывает, что численные значения КРП характеризуют тот или иной тип дефектов. В результате по значениям РВЭ и их изменениям контролируется достижение заданных эксплуатационных характеристик поверхности изделий для оптимизации технологиче-

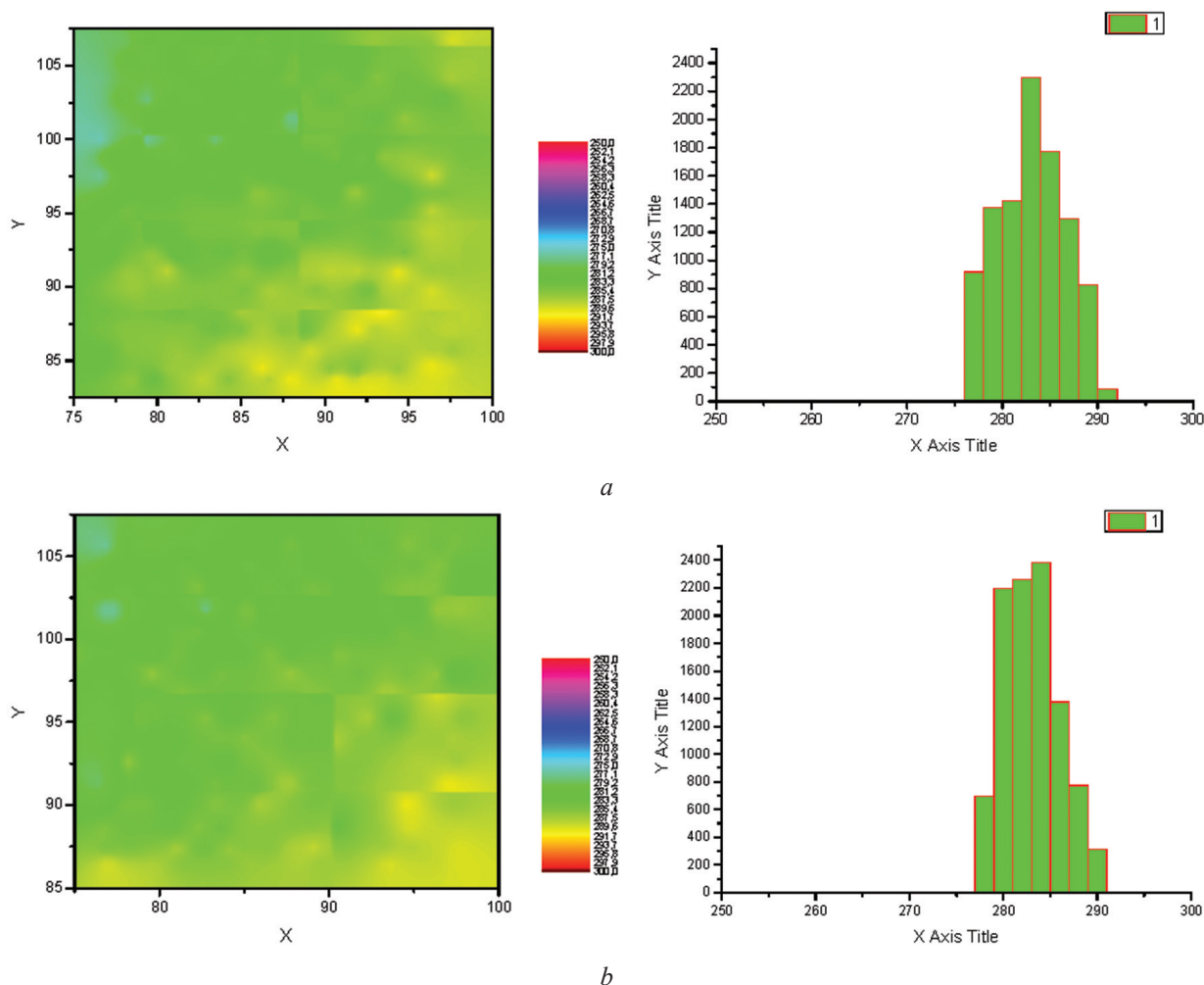


Рис. 3. Визуализированные изображения распределения КРП и гистограммы распределения значений КРП для двух экспериментальных образцов зеркал-отражателей $\text{Ø}100 \times 7,5$ мм, прошедших механо-термическую обработку по режимам № 3 (а) и № 4 (б). Шаг сканирования 200 мкм

Fig. 3. Visualized images of the distribution of contact potential difference (CPD) and histograms of the distribution of the values of the CPD for two experimental samples of mirror reflectors $\text{Ø}100 \times 7.5$ mm, which were mechanically and thermally processed in regimes № 3 (a) and № 4 (b). Scanning step 200 μm

ских режимов обработки в соответствии с функциональными назначениями формируемых приборов и устройств.

Заключение. Полученные результаты по термической и механической обработке алюминиевого сплава по технологии алмазного точения позволяют сформулировать подходы к повышению эффективности наноразмерной алмазной лезвийной обработки применительно к изготовлению металлических зеркал-отражателей с высокой отражательной способностью и лучевой прочностью для работы в экстремальных условиях. Проведенные технологические исследования и результаты обработки подтвердили перспективность алмазного лезвийного наноточения как высокопроизводительного метода обработки оптических поверхностей.

Результаты проведенных экспериментальных исследований электрофизических свойств поверхности наглядно демонстрируют технологические возможности повышения качества поверхности в процессе финишной алмазной обработки и выявления дефектов, не определяемых другими средствами контроля.

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. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – P. 687–720. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03535-7_19.

2. Колачев, Б. А. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов / Б. А. Колачев, Р. М. Габидуллин, Ю. В. Пигузов. – М.: Metallurgiya, 1980. – 280 с.
3. Тьявловский, А. К. Методы зондовой электротометрии для разработки и исследования свойств перспективных материалов / А. К. Тьявловский, К. В. Пантелеев, А. Л. Жарин // Перспективные материалы и технологии: в 2 т. / под ред. В. В. Клубовича. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2015. – Т. 1. – С. 381–394.
4. Неразрушающий контроль изделий с прецизионными поверхностями на основе методов зондовой электротометрии / Р. И. Воробей [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2016. – № 1. – С. 4–17.
5. Влияние режимов и условий электроконтактной обработки поверхности образцов металлических имплантов на работу выхода электрона / М. Г. Киселев [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2014. – № 1 (64). – С. 28–32.
6. Контроль дефектов структуры кремний-диэлектрик на основе анализа пространственного распределения потенциала по поверхности полупроводниковых пластин / Р. И. Воробей [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2. – С. 67–72.
7. Работа выхода электрона и физико-механические свойства хромсодержащих ионно-легированных сталей / А. В. Белый [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 1. – С. 21–27.

References

1. Zharin A. L. Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping. *Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, vol. 14, pp. 687–720. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03535-7_19.
2. Kolachev B. A., Gabidullin R. M., Pigusov Y. V. *Technology of heat treatment of non-ferrous metals and alloys*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 280 p. (in Russian).
3. Tyavlovskii A. K., Pantelev K. V., Zharin A. L. Methods of probe electrometry for the development and investigation of properties of promising materials. Klubovych V. V. (ed.). *Promising materials and technologies. Vol. 1*. Vitebsk, Vitebsk State Technological University Publ., 2015, pp. 381–394 (in Russian).
4. Vorobei R. I., Gusev O. K., Dubanevich A. V. Non-destructive testing of products with precision surfaces based on probe electrometry methods. *Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika* [Non-destructive Testing and Diagnostics], 2016, no. 1, pp. 4–17 (in Russian).
5. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Tyavlovskii A. K., Monich S. G. Influence of modes and conditions of electrocontact treatment of the surface of samples of metal implants on the work function of an electron. *Metrologiya i priborostroenie* [Metrology and Instrument Making], 2014, no. 1 (64), pp. 28–32 (in Russian).
6. Vorobei R. I., Zharin A. L., Gusev O. K., Petlitskii A. N., Pilipenko V. A., Turtsevich A. S., Tyavlovskii A. K. Control of defects in the silicon-insulator structure on the basis of an analysis of the potential dimensional allocation over the surface of semiconductor plates. *Pribory i metody izmerenii = Devices and Methods of Measurements*, 2013, no. 2, pp. 67–72 (in Russian).
7. Belyi A. V., Zharin A. L., Karpovich A. N., Tyavlovskii A. K. Electron work function and the physical and mechanical properties of chromium-containing ion-alloyed steels. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2016, no. 1, pp. 21–27 (in Russian).

Информация об авторах

Шаронов Геннадий Викторович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sharonov@hotmail.ru

Гусаков Григорий Анатольевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gga68@rambler.ru

Жарин Анатолий Лаврентьевич – доктор технических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: anatoly.zharin@gmail.com

Тьявловский Андрей Константинович – кандидат технических наук, заместитель декана приборостроительного факультета, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: andrey_psf@tut.by

Мухуров Николай Иванович – доктор технических наук, заведующий лабораторией, Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (Логойский тракт 22, 220090, Минск, Республика Беларусь). E-mail: n.mukhurov@dragon.bas-net.by

Information about the authors

Genadii V. Sharonov – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory, A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sharonov@hotmail.ru

Grigoriy A. Gusakov – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gga68@rambler.ru

Anatolii L. Zharin – D. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: anatoly.zharin@gmail.com

Andrei K. Tyavlovskii – Ph. D. (Engineering), Deputy Dean of the Instrumentation Engineering Faculty, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andrey_psf@tut.by

Nikolai I. Mukhurov – Dr. Sc. (Engineering), Head of the Laboratory, State Scientific and Production Association “Optic, Optoelectronic and Laser Technique” (22, Logoiskii trakt, 220090, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: n.mukhurov@dragon.bas-net.by