

УДК 621.7.08

## КАРТИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

*А. К. ТЯВЛОВСКИЙ, О. К. ГУСЕВ, К. В. ПАНТЕЛЕЕВ,  
К. Л. ТЯВЛОВСКИЙ, А. И. СВИСТУН, А. Л. ЖАРИН*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

UDC 621.7.08

## MAPPING DEFECTS OF PRECISION SURFACES USING PROBE ELECTROMETRY METHODS

*A. K. TYAVLOVSKY, O. K. GUSEV, K. U. PANTSIALEYEU, K. L. TYAVLOVSKY,  
A. I. SVISTUN, A. L. ZHARIN*

**Аннотация.** Рассмотрено использование методов зондовой электрометрии (в частности, сканирующего зонда Кельвина) для неразрушающего контроля дефектов обработки поверхности металлооптических изделий высшего класса чистоты. Показано, что применение таких методов обеспечивает выявление и картирование малоразмерных дефектов, не обнаруживаемых другими средствами неразрушающего контроля, в том числе при характерных размерах дефектов много меньше разрешающей способности картирования. В последнем случае определяется факт наличия и – оценочно – концентрация дефектов в некоторой области, соответствующей шагу сканирования.

**Ключевые слова:** поверхность, класс чистоты, неразрушающий контроль, алмазное лезвийное точение, зондовая электрометрия.

**Abstract.** To solve the problem of non-destructive testing of highest cleanliness class surfaces of metallic optical items the probe electrometry methods, in particular scanning Kelvin probe technique, are considered. Such methods provide the detection and mapping of small-sized defects inaccessible to other non-destructive testing techniques, including those with characteristic sizes much less than the mapping resolution. In the latter case the available information include defect presence and estimated defect concentration in some area corresponding to the scan step.

**Key words:** surface, cleanliness class, non-destructive testing, diamond blade turning, probe electrometry.

Современные технологии финишной обработки поверхности, в частности, технология алмазного лезвийного точения, применяемая при изготовлении металлооптических изделий, обеспечивают исключительно высокую чистоту поверхности. Так, при суперфинишной обработке зеркал-отражателей из сплава АМг-2 для мощных лазеров достигается параметр шероховатости  $R_z$  в пределах от 1 до 3,1 мкм [1]. В то же время действующие нормативные документы оговаривают способы контроля чистоты металлических поверхностей только до V класса чистоты поверхности (ширина дефектов типа «царапины» от 6 мкм, диаметр точечных дефектов от 20 мкм) [2]. Эффективное выявление таких дефектов возможно

оптическими, вихретоковыми, магнитными и радиационными методами, которые относятся к неразрушающим методам контроля, однако применение ряда перечисленных методов связано с существенными ограничениями (так, вихретоковые и магнитные методы не обеспечивают выявление дефектов вблизи краев образца, а также не позволяют осуществлять картирование поверхности образца с визуализацией пространственного распределения дефектов; радиационные методы не обеспечивают различение дефектов поверхности и объема образца), в том числе обусловленными требованиями безопасности [3]. При этом пространственная разрешающая способность указанных методов не обеспечивает контроль микродефектов поверхности после прецизионных операций чистовой обработки, при которых характерные размеры дефектов составляют менее 1 мкм (порядка длины волны оптического излучения видимого диапазона и менее). Наивысший класс чистоты поверхности оптических деталей 0–10, установленный ГОСТ 11141–84, предусматривает наличие дефектов поверхности с минимальными размерами от 2 мкм, причем стандартом не предусмотрены методы контроля таких дефектов на отражающих поверхностях [2]. В работе [1] для выявления и анализа дефектов обработки поверхности по методу алмазного лезвийного точения использовался метод атомно-силовой микроскопии (АСМ). При исключительно высокой чувствительности и разрешающей способности метод АСМ обеспечивает контроль только небольшого участка поверхности образца, причем расположение контролируемого участка не может быть определено с достаточной точностью, что делает данный метод непригодным для решения задач технологического контроля.

Для решения проблемы контроля дефектов суперфинишной обработки поверхности металлооптических изделий, включая визуализацию пространственного распределения дефектов алмазного лезвийного точения, было предложено использовать метод сканирующей зондовой электрометрии, основанный на регистрации пространственного распределения контактной разности потенциалов (КРП) поверхности с помощью сканирующего зонда Кельвина [4]. Величина КРП тесно связана с такой фундаментальной характеристикой поверхности твердого тела, как работа выхода электрона (РВЭ) с поверхности, и количественно определяется разностью значений РВЭ контролируемого участка поверхности и чувствительного элемента зонда Кельвина. Последняя в общем случае представляет собой неизвестную, но постоянную величину, что позволяет трактовать результаты измерений как относительные значения РВЭ, а построенная на их основе карта распределения КРП может рассматриваться как визуализация пространственного распределения РВЭ контролируемой поверхности.

Внешний вид использовавшегося в исследовании измерительного преобразователя показан на рис. 1. Преобразователь реализует схему

вибрирующего электрометрического зонда Кельвина и включает в себя малогабаритный чувствительный элемент, составляющий подвижную обкладку динамического измерительного конденсатора, пьезоэлектрический привод вибрации и электронный узел обработки измерительного сигнала.



Рис. 1. Измерительный преобразователь, реализующий схему измерений КРП с неполной компенсацией сигнала чувствительного элемента

Картирование поверхности образца обеспечивалось за счет его размещения на подвижном столике, перемещаемом двухкоординатной сканирующей системой на основе шаговых двигателей. Величина зазора зонд-образец в процессе сканирования составляла 0,2 мм, измерения являлись полностью бесконтактными.

Исследования пространственного распределения КРП рабочей поверхности металлооптических деталей (зеркал-отражателей) из сплава АМг-2, обработанных по методу алмазного лезвийного точения, выполненные с использованием описанного измерительного преобразователя, показали высокую однородность такого распределения. Визуализация результатов картирования поверхности одного из исследованных образцов (зеркала-отражателя квадратной формы с поперечными размерами 20 × 20 мм) показана на рис. 2, а. На рис. 2, б приведена гистограмма распределения измеренных значений КРП.

Можно видеть, что вне пределов обработанной алмазным лезвийным точением поверхности значения КРП распределены в широком диапазоне от 150 до 286 мВ. Значения КРП обработанной поверхности демонстрируют на порядок меньший разброс и находятся в пределах от 286 до 300 мВ с преобладанием значений 292...294 мВ.

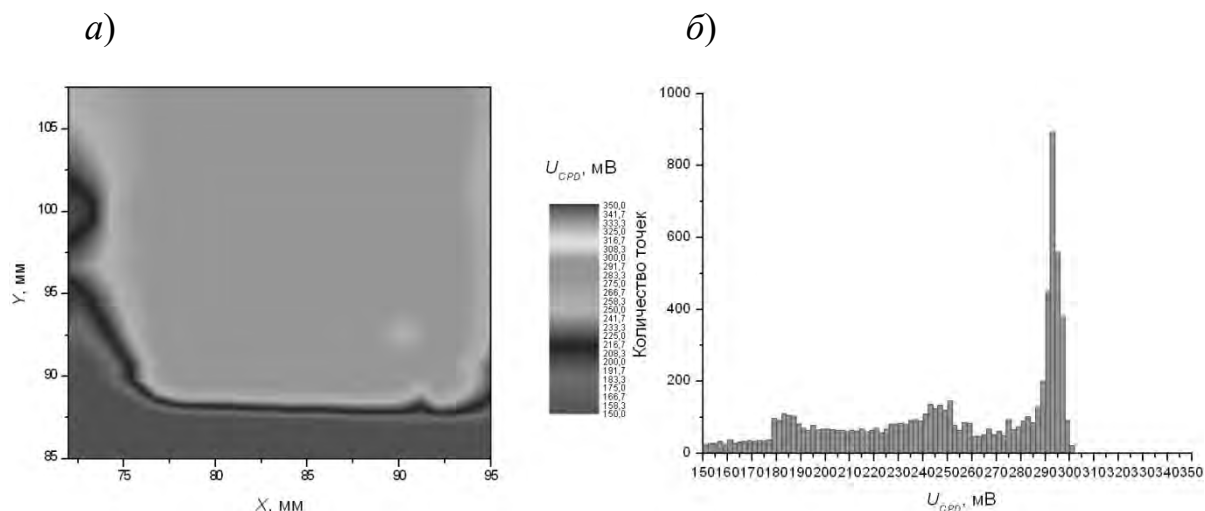


Рис. 2. Распределение КРП рабочей поверхности зеркала-отражателя из сплава АМг-2, обработанной по методу алмазного лезвийного точения: *a* – визуализированная карта распределения КРП; *б* – гистограмма распределения значений КРП

Для более крупных образцов были выполнены сканирования отдельных участков их рабочей поверхности. Так, на рис. 3. показано распределение КРП центрального, а на рис. 4. – краевого участка поверхности зеркала-отражателя из сплава АМг-2. Распределение для центрального участка поверхности на рис. 3, *a* не содержит каких-либо значимых неоднородностей, которые могут быть соотнесены с дефектами обработки. Значения КРП всех точек в области сканирования укладываются в диапазон от 277 до 291 мВ.

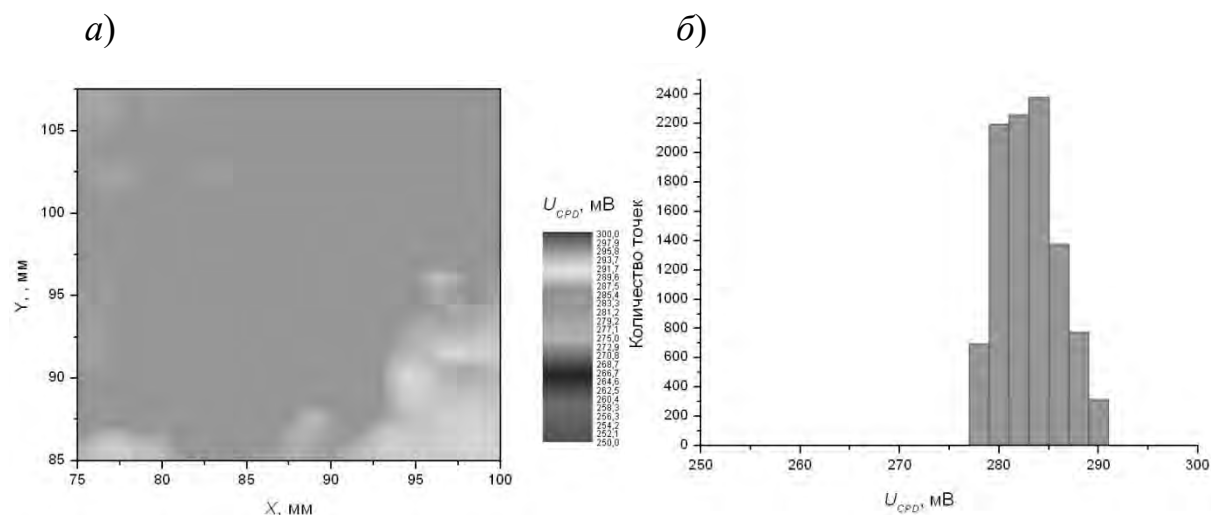


Рис. 3. Распределение КРП центрального участка рабочей поверхности зеркала-отражателя из сплава АМг-2, обработанной по методу алмазного лезвийного точения: *a* – визуализированная карта распределения КРП; *б* – гистограмма распределения значений КРП

Краевой участок поверхности зеркала-отражателя характеризуется в целом аналогичным разбросом значений КРП от 266 до 286 мВ (рис. 4, б), однако пространственное распределение этих значений отличается выраженной неравномерностью, причем более низкие значения КРП, соответствующие повышенным относительным значениям РВЭ, характерны для края образца. Можно сделать вывод, что при близких количественных характеристиках дефектности поверхности на центральных и краевых участках образцов качество поверхности вблизи края зеркала-отражателя несколько снижается по сравнению с его центральной областью, что, очевидно, связано с особенностями технологии обработки поверхности.

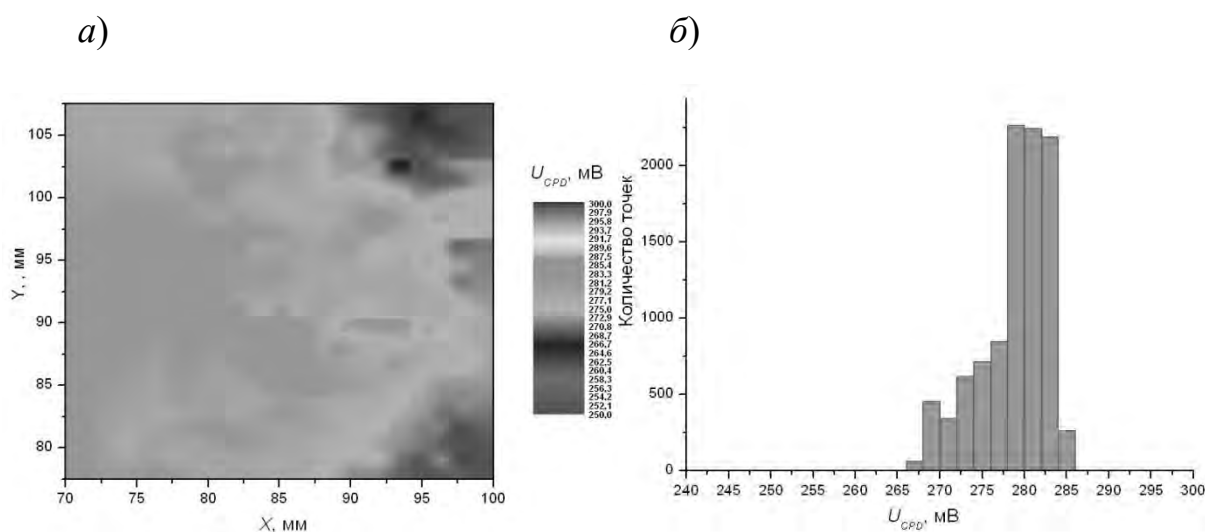


Рис. 4. Распределение КРП краевого участка рабочей поверхности зеркала-отражателя из сплава АМг-2, обработанной по методу алмазного лезвийного точения: а – визуализированная карта распределения КРП; б – гистограмма распределения значений КРП

Пространственное разрешение картирования в представленных примерах не превышало 0,5 мм, тогда как характерные размеры присутствующих неоднородностей, по данным атомно-силовой микроскопии, составляли около 1 мкм. Таким образом, в данном случае методы зондовой электрометрии не обеспечивали визуализацию отдельных неоднородностей, а выступали как средство локализации мест (областей) скопления микроскопических дефектов, выявляемых по отклонениям значений КРП в такой области от среднего для поверхности в целом. Благодаря высокой чувствительности электрометрического зонда Кельвина к любым неоднородностям электрофизических свойств поверхности это позволило в данном случае выявить незначительно повышенную дефектность краевых областей металлооптических изделий – поверхности зеркал-отражателей, обработанной по методу алмазного лезвийного точения. Следует отметить,

что данная особенность не обнаруживалась никакими другими существующими средствами контроля. При этом методы зондовой электрометрии допускают произвольное масштабирование размеров чувствительного элемента электрометрического зонда вплоть до нанометровых размеров, что при необходимости позволяет получить пространственное разрешение на уровне атомно-силовой микроскопии. С другой стороны, увеличение пространственного разрешения при сканирующих измерениях ведет к резкому увеличению времени выполнения измерений, то есть к снижению их производительности. В связи с этим в реальных условиях проведения контроля целесообразно ограничивать разрешающую способность сканирования величиной, достаточной для обнаружения и приближенной оценки концентрации дефектов в пределах шага сканирования без более подробной детализации местоположения обнаруженных дефектов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шаронов, Г. В.** Совершенствование технологии изготовления зеркал-отражателей из алюминиевых сплавов для лазерных систем передачи энергии / Г. В. Шаронов, Г. А. Гусаков // Квантовая электроника: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13–17 нояб. 2017 г. / РИВШ; редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 255–256.
2. **Гост 11141–84.** Детали оптические. Классы чистоты поверхностей. Методы контроля. – Москва: Изд-во стандартов, 1984.
3. **Кулагин, Р. Н.** Анализ средств контроля поверхностных дефектов при пластической обработке крупногабаритных изделий / Р. Н. Кулагин, Н. В. Федорова, Д. А. Сулейманов // Изв. ВГТУ. – 2014. – Вып. 8 (135), Т. 11. – С. 70–72.
4. **Воробей, Р. И.** Неразрушающий контроль изделий с прецизионными поверхностями на основе методов зондовой электрометрии / Р. И. Воробей [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2016. – № 1. – С. 4–17.

E-mail: nil\_pt@bntu.by.