

УДК 539.2+621.385.833.2

*Трушко А.В., Чижик С.А., Кузнецова Т.А., Шкадаревич А.П.,  
Курганович А.М., Городкин Г.Р., Глеб Л.К.*

## **КОНТРОЛЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

*Белорусский Национальный Технический Университет,  
Минск, Беларусь  
Институт тепло и массообмена им. Лыкова НАН Беларуси,  
Минск, Беларусь  
НПРУП ЛЭМТ, БелОМО  
Минск, Беларусь*

Высокие функциональные характеристики изделий современной оптики, в частности лазерной, во многом зависят от качества рабочих оптических поверхностей и их устойчивости в процессе эксплуатации. Важным характеристическим свойством оптических стекол является их шероховатость, значение которой необходимо контролировать при подборе режимов технологической обработки оптических поверхностей с целью улучшения их функциональных качеств.

Нанометровый диапазон шероховатости, достигаемый при обработке оптических поверхностей, требует использования высокоточных методов контроля. Традиционно шероховатость поверхностей оптических стекол определялась методом рентгеновской рефлектометрии [1]. Дополнительные возможности открываются с применением атомно-силовой микроскопии (АСМ) [2,3], которая позволяет непосредственно измерять шероховатость нанометрового диапазона, как по высоте, так и по латеральным размерам. Также АСМ позволяет контролировать единичные дефекты рельефа, которые важны при обеспечении работоспособности оптически деталей.

Одним из перспективных видов обработки оптических поверхностей является магнитореологическая полировальная технология. В работе приведены результаты сравнения полученных методом АСМ данных измерения шероховатостей поверхностей оптических призм после финишной обработки в АО ЛОМО и после магнитореологической полировки, произведенной в ИТМО НАН Беларуси.

### **Объект и метод исследования**

Исходные оптические призмы изготавливались Санкт-петербургским оптико-механическим объединением (ЛОМО). Для уменьшения шероховатости поверхности исследуемые детали подвергались магнитореологической полировке суспензиями различного состава в ИТМО НАН Беларуси. Рассматривались следующие образцы:

- исходная поверхность после финишной обработки в АО ЛОМО;
- поверхности обработанные по магнитореологической полировальной технологии суспензиями 1, 2 и 3;
- поверхность после нанесения многослойных покрытий с чередованием слоев оксида кремния и оксида циркония;
- поверхность после последующей эксплуатации в лазерном резонаторе.

При финишной обработке использовались следующие составы суспензий:

- суспензия №1 на основе карбонильного железа EW (фирмы BASF) и абразива оксида церия (3 мкм.) CrO<sub>2</sub>;
- суспензия №2 на основе карбонильного железа P10 (Россия) и оксида церия такой же фракции как и №1;

– суспензия №3 на основе карбонильного железа EW фирмы BASF и абразива в виде микропорошка алмаза (1 – 3 мкм).

Шероховатость исследуемых поверхностей оценивалась при помощи атомно-силового микроскопа NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь) [4]. Особенности применения АСМ в рассматриваемой задаче заключаются в необходимости осуществлять неразрушающий контроль дорогостоящих изделий оптики с высокими габаритными размерами (высота более 20 мм) без их разборки. Это потребовало оснастить базовую модель АСМ NT-206 дополнительной приставкой, увеличивающей расстояние между столиком-держателем образца и зондом АСМ. Выбор дефектных участков поверхности для их последующего сканирования производился с помощью оптической системы и микропозиционера NT-206 [5]. Сканирование производилось в контактном режиме с использованием зондов (MicroMasch Co., Россия). Визуализация и обработка результатов измерения методом АСМ осуществлялась с помощью программного обеспечения Surface Explorer [6].

### **Магнитореологическая обработка образцов**

Магнитореологическая полировальная технология (МПТ) – контролируемый компьютером процесс финишного полирования деталей, при котором получается высокая геометрическая точность поверхности с одновременным высоким качеством этой поверхности.

Оптическая деталь устанавливается на определенном расстоянии от движущегося рабочего колеса (инструмента) таким образом, чтобы поверхность детали и поверхность колеса сходились в точку. Источник магнитного поля, расположенный внутри движущегося колеса, генерирует неоднородное магнитное поле с градиентом в зоне обработки, направленным по нормали к поверхности колеса. Магнитореологическая полировальная жидкость (МРЖ) подается на колесо с помощью системы гидравлической подачи в зону воздействия магнитного поля, т.е. в область полюсных наконечников магнита. МРЖ под воздействием неоднородного градиентного магнитного поля прижимается к поверхности вращающегося колеса, приобретая вид узкой дорожки, и движется вместе с колесом с определенной скоростью. При этом в точке соприкосновения дорожки с поверхностью детали получается точечный (зональный) полировальный инструмент. В зоне контакта МРЖ с деталью воздействует магнитное поле, под влиянием которого жидкость переходит в пластическое состояние. При этом МРЖ разделяется на два слоя, твердообразное ядро и разжиженная прослойка (состоящая из несущей жидкости и абразивных частиц), которая находится между ядром и поверхностью оптической детали.

Специальная компьютерная программа с помощью исполнительных устройств перемещает вращающуюся деталь относительно полировальной зоны по определенному алгоритму, который дает возможность получать сверхпрецизионные детали.

Получаемый полировальный инструмент обладает постоянными физическими и полирующими свойствами, поскольку его стабильность зависит от вязкости МРЖ, которая контролируется и поддерживается на постоянном уровне системой мониторинга. Полирующие способности инструмента не изменяются в течении длительного промежутка времени.

### **Оценка шероховатостей поверхности**

Определялись следующие параметры шероховатости для участка поверхности, отображаемого АСМ-изображением:

$\bar{z}$  средняя высота АСМ-изображения (практически - положение среднеарифметической горизонтальной плоскости для всей поверхности на текущей вертикальной шкале высот АСМ-изображения)

$$\bar{z} = \frac{1}{N_x \cdot N_y} \sum_{j=0}^{N_y-1} \sum_{i=0}^{N_x-1} z_{i,j},$$

$R_a$  - среднеарифметическая шероховатость

$$R_a = \frac{1}{N_x \cdot N_y} \sum_{j=0}^{N_y-1} \sum_{i=0}^{N_x-1} |z_{i,j} - \bar{z}|,$$

$R_q$  - среднеквадратичное отклонение

$$R_q = \left( \frac{1}{N_x \cdot N_y} \sum_{j=0}^{N_x-1} \sum_{i=0}^{N_y-1} (Z_{i,j} - \bar{Z})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$R_{sk}$  - асимметрия распределения высот

$$R_{sk} = \left( \frac{1}{N_x \cdot N_y \cdot R_q^3} \sum_{j=0}^{N_x-1} \sum_{i=0}^{N_y-1} (Z_{i,j} - \bar{Z})^3 \right),$$

$R_{ku}$  - эксцесс распределения высот

$$R_{ku} = \left( \frac{1}{N_x \cdot N_y \cdot R_q^4} \sum_{j=0}^{N_x-1} \sum_{i=0}^{N_y-1} (Z_{i,j} - \bar{Z})^4 \right).$$

В приведенных формулах  $N_x$  – количество столбцов, а  $N_y$  – количество строк матрицы АСМ-изображения.

Данные отображаются в графическом виде и представлены диаграммой распределения высот, гистограммой распределения локальных углов наклона и ориентационной диаграммой

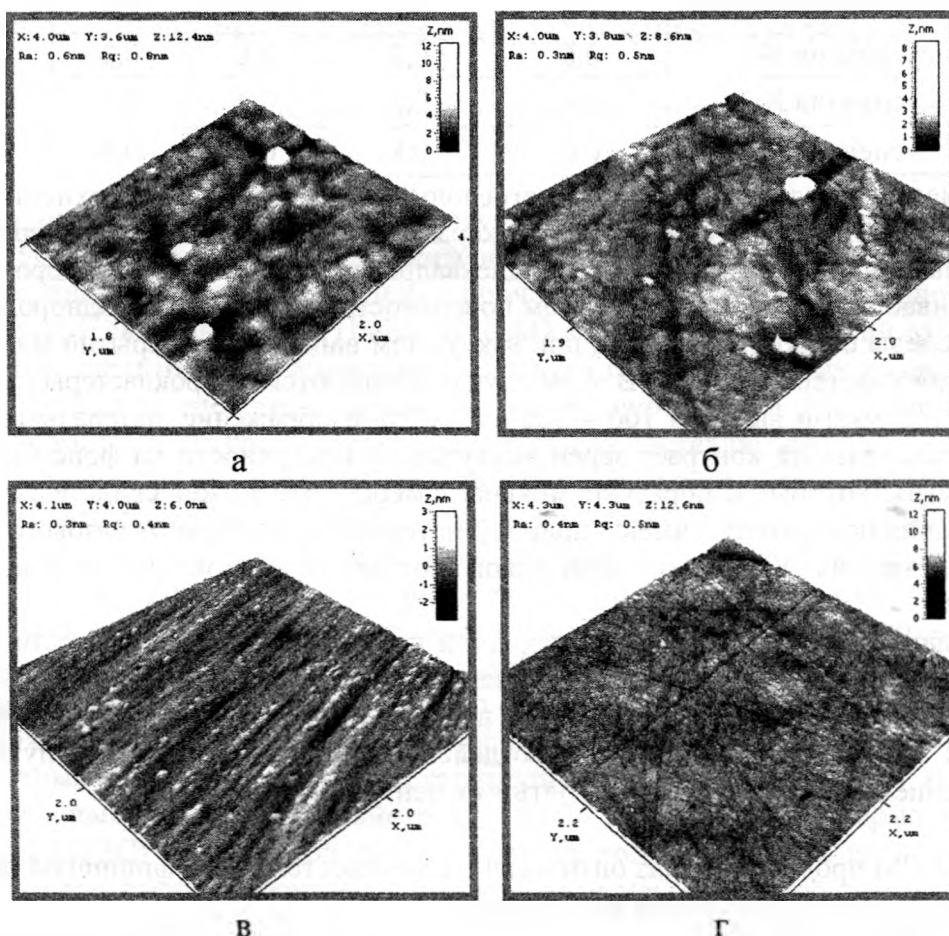


Рис. 1. Топография поверхности исследуемых образцов оптических призм, полученная методом АСМ: а – исходная поверхность после финишной обработки; б – поверхность после обработки МПТ суспензией №1; в – суспензией №2; г – суспензией №3

**Результаты исследования.** Из топографии поверхности исследуемых образцов можно судить о влиянии примененных методов обработки оптических поверхностей на поверхностную структуру образцов. Для исходной поверхности (рис.1, а) характерно наличие на поверхности сферических образований, разброс высоты которых в среднем со-

ставляет 0,8 нм. Для образца, отполированного по технологии магнитореологического полирования с суспензией №1 (рис.1, б), также характерно наличие сферических образований, но размер их меньше, 0,5 нм.

Также на поверхности присутствуют царапины, хаотично ориентированные и достаточно широкие и редкие, по сравнению с топографией образцов с другой обработкой, глубина царапин составляла около 10 нм. Для обработки по МПТ суспензией №2 рельеф поверхности изменяется, и появляются следы направленности обработки, представленные повторяющимися модуляциями (рис.1, в). Поверхность же обработанная по МПТ суспензией №3 также имеет следы поверхностной обработки в виде царапин, средняя глубина которых составляет около 15 нм, однако они ориентированы хаотично. Среднеквадратичная шероховатость для исследуемых образцов, представленная в таблице, говорит о снижении значения среднеквадратичской шероховатости оптических поверхностей примерно в 2 раза для образцов, обработанных по МПТ.

Таблица1 . Значения среднеквадратичской шероховатости для исследуемых образцов

сканобработка	32×32 мкм	10×10мкм	4×4мкм	2×2мкм
Финишная полировка	0,9	0,7	0,7	0,6
суспензия №1	0,6	0,7	0,6	0,3
суспензия №2	0,4	0,5	0,3	0,3
суспензия №3	0,6	0,8	0,4	0,4

После нанесения функционального многослойного покрытия на поверхности обнаруживается кластерная структура поверхности с характерным латеральным размером зерен-кластеров до 50 нм и их высотой до 30 нм. Среднеквадратическое отклонение шероховатости при этом увеличивается до 8 – 10 нм. В целом поверхность является более однородной, т. к. не проявляются следы обработки. Однако при вакуумном напылении покрытий может иметь место агломерация кластеров оксида. В этом случае образуются микрокластеры с латеральным размером 1 – 5 мкм и высотой 100 – 500 нм. АСМ–изображение, латеральных сил демонстрирует отличительный контраст зерен выступов на поверхности на фоне базовой поверхности покрытия, которые и образуют микроагломерат. Это может свидетельствовать о том, что кластеры на поверхности имеют природу материала отличную от базового материала поверхности покрытия. Уточнение химического состава кластеров требует дополнительных исследований.

Наличие данного типа дефектов на исходной поверхности может привести к катастрофическим последствиям при эксплуатации лазерной оптики. Были обнаружены локальные разрушения покрытий типа «прожиг» в местах наличия микрокластерных скоплений оксидов. В областях интенсивного локального воздействия луча имеет место вспучивание и хрупкое разрушение покрытия с круговым пятном в центре разрушения.

**Выводы:**

- методом АСМ проведен анализ оптических поверхностей после финишной обработки и после обработки по МПТ с суспензиями №1,2,3;
- показана эффективность комплексного АСМ контроля при оптимизации режимов технологии получения оптических поверхностей;
- значение среднеквадратичской шероховатости оптических поверхностей, обработанных по МПТ суспензией №2, наиболее низкое и примерно в 2 раза ниже, чем значения среднеквадратичной шероховатости после финишной обработки.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Протопопов В.В., Валиев К.А., Имамов Р.М. Сравнительные измерения шероховатости подложек рентгеновских зеркал методами рентгеновской рефлектометрии и скани-

рующей зондовой микроскопии // Кристаллография. 1997. Т. 42. № 4. С. 747–754. 2. Bhushan V., Fuchs H., Hosaka S. Applied Scanning Probe Methods. Springer. 2002. 475 p. 3. Арутюнов П.А., Толстихина А.Л., Демидов В.Н. Параметры шероховатости по данным измерений атомно-силового микроскопа // Микроэлектроника. 1998. Т. 27. № 6. С. 431–439. 4. Чижик С. А., Суслов А. А., Чикунов В. В., Шашолко Д. И. Атомно-силовой микроскоп НТ-206 с функцией нанотомографии. Базовая конструкция прибора // Каталог приборов, комплексов и установок, разработанных по Государственной научно-технической программе «Приборы для научных исследований», Мн. 2006. С. 35–40. 5. Чижик С. А., Шкадаревич А. П., Кузнецова Т. А., Курганович А. М. Оценка качества поверхностей лазерной оптики методом атомно-силового микроскопии // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии. Сб. докл. VII межд. семинара, ИТМО, Мн. 2006. С. 27–31. 6. SurfaceXplorer, <http://microtm.com/sx/sxr.htm>.

УДК 669.071

*Мойсейчик Е.А.*

## **МАКРОСТРУКТУРА АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

В производстве стержневой арматуры для железобетонных конструкций прослеживается устойчивая тенденция к снижению расхода дорогостоящих легирующих элементов при одновременном повышении прочности проката. Основные поставщики арматуры на белорусский рынок (РУП «БМЗ», ОАО «ЗСМК», Челябинский МК и др.) высоких прочностных характеристик арматурного проката из углеродистых и низколегированных сталей достигают за счет его термообработки. В основе этого процесса лежит формирование требуемой структуры проката и свойств его составляющих, дислокационных субструктур в процессе температурно-временных воздействий в линии прокатных станов [1–3]. В отдельных исследованиях [4,5] установлено, что в результате термообработки арматуры по режиму прерывистой закалки в сечении стержней формируется градиентная структура в виде различных структурных слоев. Микроструктура слоев в направлении от поверхности к осевой зоне изменяется. Эти исследования [4], проведенные с использованием термически упрочненной на класс А500С арматуры из низкоуглеродистых сталей производства ОАО «ЗСМК», показали, что строение арматурных стержней зависит от диаметра стержня [4]. С увеличением диаметра от 12 до 22 мм растет и толщина упрочненных поверхностных слоев при сохранении структурных составов. Наличие в поперечном сечении арматурных стержней диаметром 16,20,22мм (материал арматуры- Ст3пс) и 40мм(сталь 18Г2С) структурной неоднородности подтверждают и исследования диаметрального распределения микротвердости. При этом максимальную твердость имеет приповерхностная часть арматурного стержня, а минимальную- центральный участок [4,5].

Поставляемая металлургами арматура в процессе изготовления железобетонных конструкций подвергается ряду технологических воздействий (резка, правка, пластическое деформирование, сварка и т.д.). При работе железобетонного элемента под нагрузкой происходит изменение первоначального структурно-фазового состояния арматуры. Длительные сроки эксплуатации железобетонных конструкций вследствие этого приводят к ухудшению механических характеристик арматуры [6].

Прочностные и деформационные характеристики отдельных слоев арматурных стержней определяют механические характеристики стержня в целом, существенно ска-