

Е. С. Мишечкин¹✉, М. П. Егоренко¹, Н. А. Гурин^{2,3}

Сравнение глубокого шлифования и полирования классическим методом с предлагаемым методом на примере подложек для оптических покрытий лазерных систем

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,

г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский приборостроительный завод, г. Новосибирск, Российская Федерация

³ Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук,

г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: mishechkines@mail.ru

Аннотация. В работе проведено сравнительное исследование классического метода глубокой шлифовки и полировки и предложенного метода прецизионной обработки оптических подложек для подложек оптических покрытий лазерных систем. Шероховатость поверхности определялась методом теневоего анализа с использованием интерференционного микроскопа Линника. На основе экспериментальных данных установлены зависимости коэффициента рассеяния света и порога лучевой прочности от параметров микрорельефа. Показано, что классический метод приводит к формированию субповерхностных дефектов и повышенной шероховатости, что ограничивает энергетическую стойкость покрытия. Предложенный метод обеспечивает снижение шероховатости поверхности с 2,37 мкм до 0,75 мкм, уменьшение рассеяния света на порядок и увеличение порога лучевой прочности в 1,7–1,8 раза. Полученные результаты демонстрируют перспективность предлагаемого подхода для изготовления оптических элементов, работающих при высоких плотностях лазерного излучения.

Ключевые слова: оптические покрытия для лазерных систем; шероховатость поверхности; коэффициент рассеяния света; порог лучевой прочности; субповерхностные дефекты; полировка оптики; интерференционный микроскоп Линника; оптические материалы; лазерная оптика; микрорельеф поверхности

E. S. Mishechkin¹✉, M. P. Egorenko¹, N. A. Gurin^{2,3}

Comparison of Deep Grinding and Polishing using the Classical Method with the Proposed Method using Laser-Resistant Coatings as an Example

1 Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

2 Novosibirsk Instrument-Making Plant, Novosibirsk, Russian Federation

3 Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: mishechkines@mail.ru

Abstract. This paper presents a comparative study of the classical deep grinding and polishing method and the proposed precision machining method for optical substrates used for optical coatings in laser systems. Surface roughness was determined by shadow analysis using a Linnik interference microscope. Based on experimental data, the dependences of the light scattering coefficient and the radiation damage threshold on microrelief parameters were established.

It was shown that the classical method leads to the formation of subsurface defects and increased roughness, which limits the energy resistance of the coating. The proposed method reduces surface roughness from 2,37 μm to 0,75 μm , reduces light scattering by an order of magnitude, and increases the radiation damage threshold by 1,7–1,8 times.

The obtained results demonstrate the potential of the proposed approach for the fabrication of optical elements operating at high laser radiation densities.

Keywords: Optical coatings for laser systems; surface roughness; light scattering coefficient; radiation hardness threshold; subsurface defects; polishing of optics; Linnik interference microscope; optical materials; laser optics; surface microrelief

Введение

В связи с этим возникает необходимость исследования влияния режимов глубокого шлифования–полирования на параметры поверхности оптических деталей, а также разработки методов контроля шероховатости и оценки качества обработки.

В настоящее время повышение качества поверхности оптических деталей является одной из ключевых задач современного оптического производства. Особенно высокие требования предъявляются к деталям, используемым в составе лазерных систем высокой мощности, поскольку состояние поверхностного слоя оказывает непосредственное влияние на оптические потери, стабильность параметров излучения и надежность работы многослойных оптических покрытий.

Современные исследования в области технологии обработки оптических материалов направлены на снижение шероховатости поверхности, уменьшение глубины нарушенного слоя и повышение лучевой прочности оптических элементов. Значительное внимание уделяется совершенствованию процессов глубокого шлифования и полирования, а также исследованию влияния микродефектов поверхности на характеристики оптических покрытий.

В работе Alexei Kozlov, Stavros Demos, David Canning и соавторов исследовалось изменение характеристик многослойных диэлектрических покрытий при длительном воздействии высокоинтенсивного лазерного излучения. Авторами установлено, что наличие поверхностных дефектов и загрязнений приводит к снижению порога лазерного повреждения и ускоренной деградации покрытий [1].

В исследовании Kyle R. Kafka, Brittany Hoffman, Hu Huang и Stavros Demos рассмотрены механизмы лазерного повреждения зеркальных покрытий при взаимодействии лазерного излучения с модельными загрязняющими частицами. Авторы показали, что локальные дефекты поверхности являются концентраторами энергии лазерного излучения и существенно влияют на устойчивость покрытий к лучевому воздействию [2].

В связи с этим актуальной задачей является разработка и исследование методов обработки оптических деталей, обеспечивающих снижение дефектности поверхностного слоя и повышение качества поверхности при сохранении технологической производительности процесса.

Несмотря на развитие технологий обработки оптических деталей, проблема обеспечения высокой однородности поверхностного слоя при сохранении производительности процесса обработки остается актуальной. Традиционные методы глубокого шлифования и полирования не всегда обеспечивают требуемое качество поверхности для многослойных оптических покрытий, применяемых в лазерных системах высокой мощности. Наличие микродефектов, остаточных напряжений и повышенной шероховатости приводит к увеличению рассеяния света и снижению лучевой прочности оптических элементов.

В связи с этим возникает необходимость исследования влияния режимов глубокого шлифования–полирования на параметры поверхности оптических деталей, а также разработки методов контроля шероховатости и оценки качества обработки.

Методы и материалы

Метод обработки заключается в подборе оптимальных режимов глубокого шлифования–полирования, выборе состава связанного абразивного инструмента и последующем анализе влияния технологических параметров на качество поверхности оптических деталей. Основной задачей метода является снижение шероховатости поверхности и глубины нарушенного слоя, обеспечивающих повышение качества многослойных оптических покрытий и улучшение оптических характеристик деталей.

Работа осуществлялась на шлифовальном станке, оснащем алмазным, корундовым и нитрид-боридным инструментом.

В качестве обрабатываемых материалов выбраны: оптическое стекло (марка К8), кварц, германий.

Параметры обработки определены в соответствии с рекомендациями, содержащимися в источнике [3]:

- скорость вращения шпинделя: от 50 до 150 об/мин;
- давление поводка: от 60 до 100 кг;
- подача инструмента: от 0,5 до 5 мм/мин.

Для решения поставленных задач в работе использовался комплекс экспериментальных, аналитических и расчетных методов исследования, направленных на оценку качества поверхности оптических деталей после глубокого шлифования–полирования.

Исследование параметров поверхности проводилось с применением методов оптической микроскопии и интерференционного контроля. Анализ микрорельефа поверхности выполнялся с использованием интерференционного микроскопа Линника, позволяющего определять параметры шероховатости и выявлять локальные дефекты поверхностного слоя.

Контроль шероховатости поверхности осуществлялся методом теневого анализа микронеровностей при наклонном освещении поверхности. Определение высоты микронеровностей проводилось расчетным методом на основании измерения геометрических параметров тени.

Для обработки экспериментальных данных использовались методы математических вычислений и анализа данных, позволяющие получить зависимости шероховатости поверхности и глубины нарушенного слоя от технологических режимов обработки.

Полученные результаты исследований анализировались сравнительным методом путем сопоставления параметров поверхности, полученных при использовании традиционного и предлагаемого методов глубокого шлифования–полирования.

Интерференционный микроскоп Линника использовался для оценки микро рельефа поверхности. Метод основан на анализе тени, формируемой неровностями поверхности при наклонном освещении. При падении света под углом θ к поверхности микронеровность высотой h создает тень длиной l , которая наблюдается в микроскопе. Геометрическая связь между высотой неровности и длиной тени определяется тригонометрическими соотношениями.

Величина шероховатости определяется по формуле:

$$h = l \times \operatorname{tg} \theta, \quad (1)$$

где h – высота неровности поверхности; l – длина наблюдаемой тени; θ – угол падения света на поверхность.

Сравнительный анализ параметров шероховатости поверхности при обработке оптических деталей, в зависимости от использованных методов, представлен в табл. 1.

Таблица 1 – Расчет шероховатости

№ измерения	Классический метод		Предлагаемый метод		Угол падения света θ , град
	l , мкм	h , мкм	l , мкм	h , мкм	
1	4,0	2,31	1,2	0,69	30°
2	3,5	2,02	1,5	0,87	
3	5,0	2,89	1,1	0,63	
4	4,2	2,42	1,3	0,75	
5	3,8	2,19	1,4	0,81	
Среднее значение	4,1	2,37	1,3	0,75	

Таким образом, применение предлагаемого метода позволяет уменьшить среднюю шероховатость поверхности оптической детали примерно в 3 раза.

Рассеяние света на оптической поверхности определяется параметрами микрорельефа. Для поверхностей с малой шероховатостью используется выражение, согласно которому коэффициент рассеяния света определяется выражением (2):

$$K_p = \left(\frac{4\pi R_q}{\lambda} \right)^2, \quad (2)$$

где K_p – коэффициент рассеяния света; R_q – среднеквадратичная шероховатость; λ – длина волны лазерного излучения.

Расчеты были выполнены при длине волны равной 1064 нм.

Расчет классическим методом, при условии, что длина волны λ равна 1064 нм, а среднеквадратичная шероховатость R_q равна 2,37 мкм, выглядит следующим образом:

$$K_p = \left(\frac{4\pi \cdot 2,37}{1064} \right)^2 = 7,8 \cdot 10^{-4} .$$

Расчет для предлагаемого метода будет выполнен для длины волны λ , равной 1064 нм и среднеквадратичной шероховатости $\sigma = 0,75$ мкм, и выглядит как:

$$K_p = \left(\frac{4\pi \cdot 0,75}{1064} \right)^2 = 7,8 \cdot 10^{-5} .$$

Полученная зависимость показывает, что коэффициент рассеяния света квадратично возрастает с увеличением шероховатости поверхности [4,5]. При увеличении параметра шероховатости от 0,75 мкм до 2,37 мкм уровень рассеяния возрастает на порядок.

Таким образом, снижение шероховатости поверхности является одним из ключевых факторов уменьшения оптических потерь в оптических элементах с оптическими покрытиями в лазерных системах.

Влияние шероховатости на порог лучевой прочности. Микронеровности поверхности выступают локальными концентраторами электромагнитного поля и приводят к увеличению поглощения энергии лазерного импульса [6–8]. Для сравнительной оценки влияния шероховатости поверхности на лучевую прочность покрытия использовалась относительная расчетная зависимость, основанная на сравнении параметров шероховатости исследуемой и эталонной поверхностей, которое рассчитывается по формуле (3):

$$H = H_o \times \frac{R_{qO}}{R_q}, \quad (3)$$

где H – расчетный порог лучевой прочности исследуемой поверхности, Дж/см²; H_o – порог лучевой прочности поверхности, полученной классическим методом, Дж/см²; R_{qO} шероховатость поверхности, полученной классическим методом, нм; R_q – шероховатость исследуемой поверхности, нм.

Расчет лучевой прочности при условии, что $H_o = 5$ Дж/см²:

$$H = 5 \frac{2,37}{0,75} = 15,8 \text{ Дж/см}^2 .$$

Оценка увеличения и отношение показателей:

$$\frac{\text{new}}{\text{classic}} = \frac{H}{H_0} = \frac{15,8}{5} = 3,16.$$

Таким образом, предложенный метод обеспечивает увеличение порога лучевой прочности примерно в 3 раза.

Итоговый сравнительный анализ показателей предлагаемого метода с классическим приведен в табл. 2.

Таблица 2 – Сравнительный анализ показателей

Параметр	Классический метод	Предлагаемый метод
Шероховатость R_a , мкм	2,37	0,75
Коэффициент интегрального рассеяния	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$
Порог лучевой прочности, Дж/см ²	5	15,8

Полученные результаты показывают, что снижение микрорельефа поверхности приводит к существенному уменьшению коэффициента рассеяния света и увеличению порога лучевой прочности оптических покрытий.

Результаты и обсуждение

Шероховатость поверхности оказывает существенное влияние на оптические потери и порог лучевой прочности оптических элементов. В рамках данной работы была проанализирована зависимость коэффициента рассеяния света и порога лучевой прочности от среднеквадратичной шероховатости поверхности.

Зависимость коэффициента рассеяния света от шероховатости поверхности представлена на рис. 1. Расчеты выполнены в рамках приближения для длины волны $\lambda=1064$ нм.

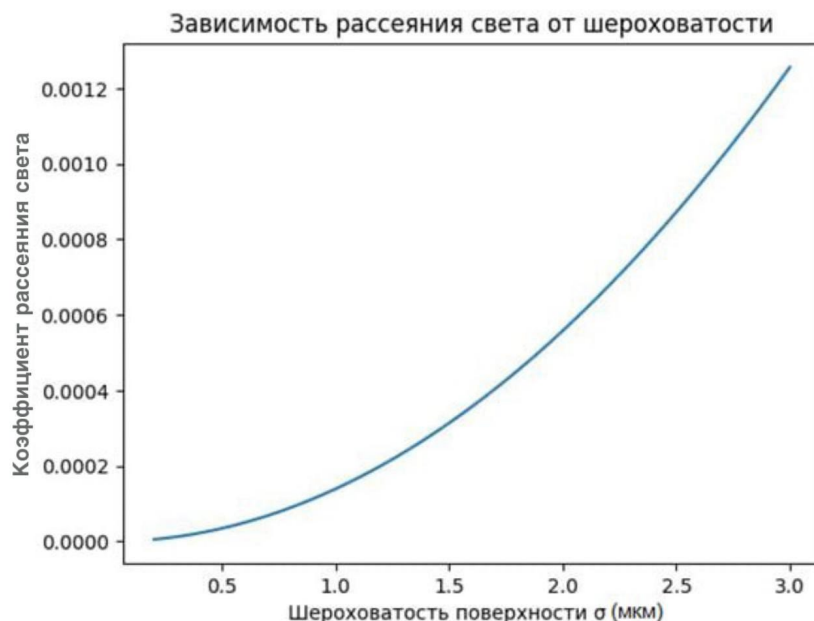


Рис. 1. Зависимость коэффициента рассеяния света от среднеквадратичной шероховатости поверхности при длине волны $\lambda=1064$ нм

Как видно из рисунка 1, увеличение шероховатости поверхности приводит к квадратичному росту коэффициента рассеяния света. При увеличении параметра шероховатости с 0,5 до 2,5 мкм значение возрастает больше чем на порядок.

Зависимость порога лучевой прочности от шероховатости поверхности представлен на рис. 2.

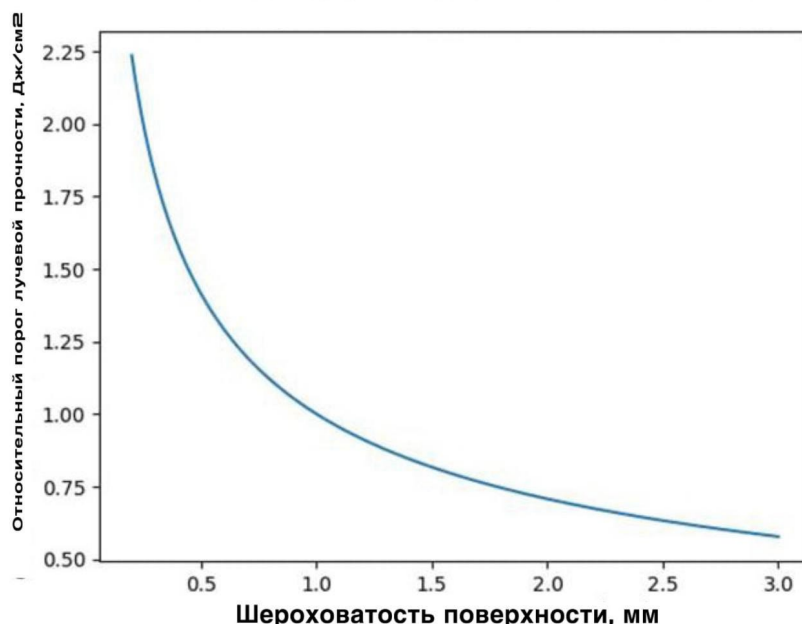


Рис. 2. Зависимость относительного порога лучевой прочности от шероховатости поверхности

Как показано на рис. 2, уменьшение шероховатости приводит к увеличению порога лучевой прочности, что связано с уменьшением концентрации дефектов [6–8]. Известно, что субповерхностные повреждения существенно снижают порог лучевой прочности [9, 10].

Сравнительный анализ показывает, что снижение шероховатости поверхности с 2,37 мкм (классический метод) до 0,75 мкм (предлагаемый метод) приводит к:

- уменьшению коэффициента рассеяния света примерно на порядок;
- увеличению порога лучевой прочности примерно в 3 раза.

Таким образом, полученные зависимости, представленные на рисунках 1 и 2, подтверждают эффективность предлагаемого метода обработки поверхности для повышения порога лучевой прочности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Alexei Kozlov. Long-term monitoring the damage performance of multilayer dielectric grating samples residing inside the compressor chamber of the OMEGA EP laser. // Optical Engineering. – 2021.

2. Brittany Hoffman. Mechanisms of picosecond laser-induced damage from interaction with model contamination particles on a high reflector. // Optical Engineering. – 2021.
3. Бобков, А.В., Разработка технологии обработки металлических деталей для оптического приборостроения связанным алмазно-абразивным инструментом [Электронный ресурс] / Естественные и технические науки. 2007. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15860831> – Загл. с экрана.
4. Church E.L., Takacs P.Z. Specification of surface figure and roughness in optical manufacturing // Applied Optics. – 1993. – Т. 32, № 19. – С. 3344–3353.
5. Yu, Leyangyang. 1.07 μm laser ablation behavior of polycarbosilane based reflective/ablative composite coatings on the surface of graphite. // Applied Optics. – 2024.
6. Feit M.D., Rubenchik A.M. Mechanisms of laser-induced damage in optical materials // Proc. SPIE. – 1998. – Т. 3244. С.78.
7. Stuart B.C., Feit M.D. и др. Laser-induced damage in dielectrics // Physical Review Letters. – 1995. – Т. 74. С.36-44.
8. Duparré A., Tünnermann A. Laser damage thresholds of optical coatings // Proc. SPIE. – 2002.
9. Duparré A. и др. Surface characterization techniques // Applied Optics. – 2002. – Т. 41. С.48-56.
10. Negres R.A., Feit M.D., Rubenchik A.M. Subsurface damage // Proc. SPIE. – 2009. С. 123.

© Е. С. Мишечкин, М. П. Егоренко, Н. А. Гурин, 2026