

Формирование оптически гладкой поверхности собирающего зеркала из стали 316L(N)-IG для оптической диагностики в ИТЭР

© И.Б. Терещенко¹, Д.С. Самсонов¹, Е.Е. Мухин¹, Г.В. Маринин², Д.В. Терентьев², В.Е. Патрикеев³,
А.Л. Худoley⁴, П.Н. Кумейша⁴, В.Д. Калганов⁵, К.А. Бенкен⁶

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия

² Русские Технологии,
Санкт-Петербург, Россия

³ АО ЛЗОС,
Лыткарино, Россия

⁴ ИТМО им. А.В. Лыкова,
Минск, Беларусь

⁵ МРЦ по направлению „Нанотехнологии“
СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

⁶ Ресурсный центр микроскопии и микроанализа СПбГУ,
Санкт-Петербург, Россия

e-mail: i.tereschenko@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 13.05.2025 г.

В окончательной редакции 24.07.2025 г.

Принята к публикации 04.08.2025 г.

Представлены результаты отработки технологии полирования поверхности нержавеющей стали 316L(N)-IG для использования в качестве крупногабаритных зеркал системы сбора излучения диагностики ДТР ИТЭР. Исследованы два метода — абразивное и магнитореологическое полирование. На модельных образцах диаметром 22 mm и 6×6 mm достигнута требуемая шероховатость поверхности ($R_q/\lambda < 0.012$). Однако при масштабировании процесса на образец большего размера отмечено ухудшение параметров, что указывает на необходимость дальнейшей оптимизации технологии. Полученные результаты подтверждают применимость разработанных подходов и создают основу для масштабируемой технологии полирования крупногабаритной оптики.

Ключевые слова: абразивное полирование, магнитореологическое полирование, сталь 316L(N)-IG, ИТЭР.

DOI: 10.61011/OS.2025.08.61515.8165-25

Введение

Оптическая система сбора излучения диагностики томсоновского рассеяния в диверторе (ДТР) ИТЭР включает зеркальную систему, передающую собранное излучение за пределы вакуумного объема и состоящую из узла „первого зеркала“ (First Mirror Unit, FMU) и 4 последовательно отражающих крупногабаритных зеркал („вторые зеркала“ M2-M5) [1], не подверженных загрязнению, ключевым требованием которых является максимальный коэффициент отражения ($> 92\%$) в диапазоне 540–1100 nm и его неизменность при перепадах температуры и возможном прорыве воды в вакуумный объем. Для FMU, находящегося в зоне интенсивного теплового и радиационного воздействия, важна высокая теплопроводность λ_{th} , поэтому нержавеющей сталь 316L(N)-IG не применяется, уступая таким материалам, как Mo, W и CuCrZr [2,3] (таблица). В то же время для „вторых зеркал“, не подверженных загрязнению и размещённых на массивной конструкции из нержавеющей стали [4], этот материал остаётся предпочтительным благодаря высокой термической стабильности (E/ρ),

стабильности формы и конструкционной совместимости с опорной рамой.

Аустенитная нержавеющая сталь, выбранная в качестве основного конструкционного материала ИТЭР из-за ее немагнитных свойств, не относится к традиционным оптическим материалам из-за высокого уровня пластичности, которая затрудняет получение поверхностей оптического качества путем шлифовки/полировки. Кроме того, сталь обладает низким коэффициентом отражения ($\sim 60\%$) в видимом диапазоне, что делает необходимым формирование на ее поверхности высокоотражающего покрытия для достижения требуемых оптических характеристик. Отражательная способность высокоотражающего тонкопленочного покрытия зависит от совокупности оптических свойств покрытия и морфологических характеристик подложки. Выраженная шероховатость поверхности увеличивает диффузное рассеяние, а микроскопические дефекты могут создать локальные напряжения, влияющие на стойкость зеркального покрытия. Это обуславливает необходимость достижения при полировании минимальных подповерхностных дефектов,

Механические свойства SS316L(N)-IG и других материалов (при 20 °C)

	SS316L(N)	CuCrZr	W	Mo
Удельный вес γ (10^4 N m^{-3})	8.03	8.7	19.3	10.2
Модуль упругости E (GPa)	200	127.5	400	330
Удельная жесткость E/γ (10^6 m)	2.5*	1.46	2.1	3.2
Термический коэффициент расширения α (10^{-6} K^{-1})	16	16.7	4.5	5.35
Теплопроводность λ_{th} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	15	318	175	138
Температурная стабильность α/λ_{th} (10^{-8} mW^{-1})	107**	0.5	2.57	3.9

Примечание: *Удельная жесткость сравнима с другими материалами. **Наилучшая температурная стабильность, характеризующаяся отношением коэффициента линейного расширения материала к его теплопроводности.

высокой чистоты и оптимальной микроструктуры для адгезии.

Для количественной оценки рассеяния (Total Integrated Scattering, TIS) Bennett и Porteus [5] установили зависимость с шероховатостью:

$$\text{TIS}_{\text{BP}} = R_0 \left[1 - e^{-\left(\frac{4\pi R_q \cos \theta_i}{\lambda} \right)^2} \right],$$

где R_0 — теоретическое значение коэффициента отражения поверхности, R_q — среднеквадратичное значение шероховатости поверхности, θ_i — угол падения на поверхность, λ — длина волны света.

Для обеспечения работоспособности системы сбора излучения ДТР ИТЭР ключевым критерием является минимизация диффузного рассеяния, выраженная условием $\text{TIS}_{\text{BP}} < 1\%$. На примере стали 316L(N)-IG с коэффициентом отражения $R_0 = 0.6$ ($\lambda = 540 \text{ nm}$) данный критерий достигается при среднеквадратической шероховатости $R_q < 6.4 \text{ nm}$ ($R_q/\lambda < 0.012$). Однако достижение таких параметров для нержавеющей стали требует разработки специализированных технологий обработки. При этом следует учитывать, что приведенный критерий $R_q < 6.4 \text{ nm}$ носит ориентировочный характер, и его применимость в реальных условиях требует дополнительного обоснования с учетом особенностей поверхности и эксплуатационных нагрузок.

Настоящая работа, не претендуя на всеобъемлющее решение вопроса, подытоживает некоторый опыт разработки технологических процессов абразивного и магнитореологического полирования стали 316L(N)-IG. Абразивная обработка стали сочетает механическое воздействие абразивных частиц и химическое влияние поверхностно-активных веществ (ПАВ) [6]. Соотношение этих факторов определяет шероховатость, степень повреждений подповерхностного слоя и электронное состояние поверхности. Так, снижение работы выхода электронов (РВЭ) поверхности после абразивной обработки уменьшает склонность к питтинговой коррозии [7], а добавление окислителя в полирующую суспензию повышает скорость удаления материала и

улучшает гладкость поверхности [8]. Абразивные зерна действуют по двум механизмам: микрорезание (постоянный контакт с поверхностью) и микроударное воздействие (периодический контакт незакрепленных зерен) [9]. Первый может вызывать царапины на поверхности, а мельчайшие частицы — проникать в материал (шаржирование) [10], формируя слой с нестабильными физико-механическими характеристиками [11,12]. Учитывая недостаточную изученность влияния шаржированного слоя на оптическую стабильность, его удаление представляется обязательным. Принцип работы магнитореологического полирования (МРП) основан на изменении реологических свойств МРПЖ в магнитном поле [13,14]. В зоне обработки формируется полирующая область: твердообразное ядро (эластичная подложка) и жидкая прослойка с абразивами. В отличие от традиционных методов МРП обеспечивает мгновенную адаптацию к поверхности детали без повреждения материала и формирования шаржированного слоя [15]. Однако технологические процессы МРПЖ разработаны в основном для оптических материалов [16] в отличие от сталей [17].

В рамках настоящего исследования выполнен сравнительный анализ двух подходов формирования оптически гладкой поверхности на образцах нержавеющей стали 316L(N)-IG. Параметры топографии поверхности получены на оптических профилометрах Zygo ZeScope, 4D Technology NANOCAM, MicroXAM-800, а также атомно-силовом микроскопе NTEGRA-AURA. Морфология поверхности образцов исследовалась с использованием сканирующего электронного микроскопа (SEM) MERLINTM в детекторах вторичных электронов Эверхарта-Торнли (SE2), а элементный анализ проводился методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) на приставке INCA. Диффузное рассеяние измерено на интегрирующей сфере UPB-150-ART с установленным спектрометром CAS140C-171.

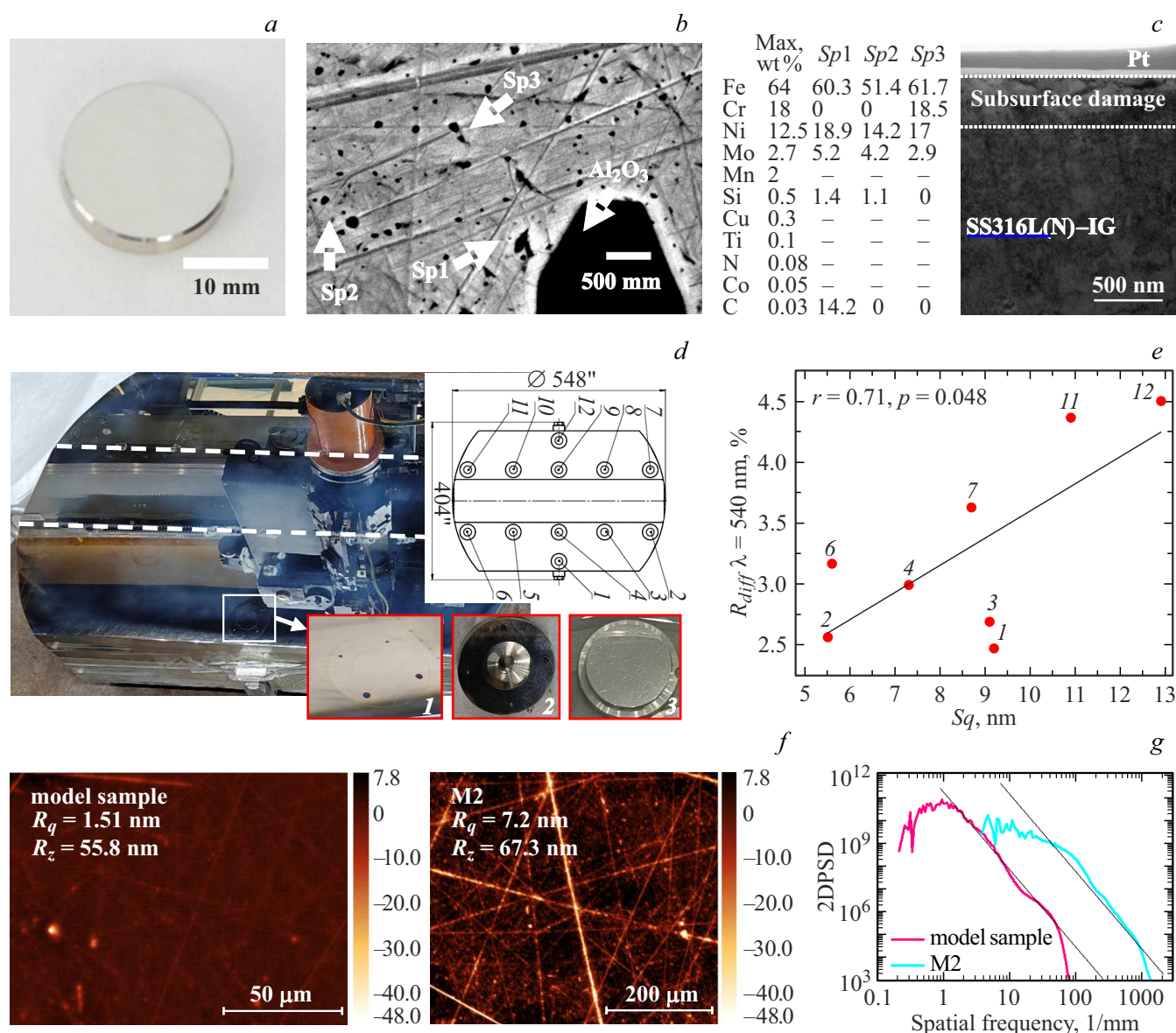


Рис. 1. (а) Фотография модельного образца после полирования. (b) SEM+EDX-снимок 50 К поверхности после полирования с включениями углерода. (с) ТЕМ-снимок шаржированного слоя после полирования. (d) Фотография зеркала М2 после полирования в сборе с паразитными поверхностями, в которые установлены образцы-свидетели, где 1 — сборка образца-свидетеля в оправке на паразитной поверхности, 2 — оправка образца-свидетеля, 3 — образец-свидетель $\varnothing 22$ мм. (е) Корреляция между диффузным отражением и параметром шероховатости R_q образцов-свидетелей зеркала М2. (f) Топография поверхности модельного образца и зеркала М2. (g) Сравнение функции 2DPSD поверхности модельного образца и зеркала М2.

Абразивное полирование

Технология абразивного полирования, направленная на минимизацию параметра шероховатости R_q , апробирована на модельных образцах диаметром 22 мм (рис. 1, а). Процесс отработки выполнен на трех группах образцов на смоляном полировальнике с использованием различных суспензий на основе алмазной пасты ACM 2/1, ACM 1/0 с CuSO_4 , ACM 0.5/0 с 2% раствором щавелевой кислоты. Минимальное значение среднеквадратической шероховатости $R_q = 1.51$ nm получе-

но при использовании мелкодисперсной фракции 0.5/0, тогда как применение 2/1 дало наибольшее значение $R_q = 2.31$ nm. Микроскопический анализ поверхности после ACM 0.5/0 выявил два типа дефектов: хаотично расположенные царапины и равномерно распределенные углеродные частицы размером 50–200 nm (рис. 1, b), не коррелирующие с царапинами, что может указывать на их внедрение на раннем этапе обработки. Образованный шаржированный слой имеет глубину около $0.3 \mu\text{m}$ (рис. 1, c), а топография поверхности соответствует требуемому параметру $R_q/\lambda < 0.012$ (рис. 1, f).

Масштабирование технологического процесса проводилось на крупногабаритном макете зеркала М2 540×110 mm (рис. 1, *d*). Проведенные исследования процесса полирования выявили ряд ключевых закономерностей и технологических ограничений. Основной проблемой оказалось устойчивое чередование двух типов дефектов поверхности — питтинга и ласин, причем устранение одного типа дефектов неизбежно приводило к проявлению другого. Материал полировальника продемонстрировал существенное влияние на результат: смоляной полировальник показал наилучшие результаты в сочетании с суспензиями на основе оксида алюминия (WCA), фетровый и полиуретановый полировальники оказались менее эффективными и склонными провоцировать питтинг, особенно при использовании с оксидом церия („У“ $0.8\text{--}1.2\text{ }\mu\text{m}$, „Д“ $0.4\text{--}0.6\text{ }\mu\text{m}$, „Нева-3“). Наиболее эффективной комбинацией для борьбы с питтингом стало использование смоляного полировальника с суспензией WCA-3 (оксид алюминия, $\sim 3\text{ }\mu\text{m}$) и добавлением глицерина, что обеспечивало устранение питтинга за 8 h обработки, однако вызывала образование многочисленных ласин. Алмазные суспензии обеспечивают наилучшую отражательную способность и самую низкую шероховатость, однако не устраняют питтинг даже после длительной (60 h) обработки.

Сложность обработки крупногабаритной детали связана с несколькими факторами: 1) увеличенным временем жизни абразива, что приводит к изменению динамики воздействия абразивных частиц, 2) часть поверхности оголяется и подвергается воздействию окружающей среды, что приводит к окислению или другим нежелательным изменениям структуры материала.

Для выполнения характеристики поверхности (шероховатость и диффузное рассеяние) были извлечены образцы-свидетели №1–12 $\varnothing 22$ mm, расположенные на паразитных поверхностях блока зеркала М2 (рис. 1, *d*, 1–3). Среднее значение R_q составило 8.4 nm, что примерно в 5 раз превышает аналогичный показатель для модельного образца ($R_q/\lambda > 0.012$) и указывает на необходимость оптимизации технологии при переходе к крупногабаритным зеркалам. Выявлена умеренная положительная корреляция между шероховатостью и диффузным отражением $r = 0.71$, $p = 0.048$ (рис. 1, *e*), подтверждающая влияние микрогеометрии на оптические свойства. Длина волны 540 nm выбрана как наиболее чувствительная к рассеянию в рабочем диапазоне 540–1100 nm. Для зеркала М2 измеренная шероховатость R_q составила 7.2 nm ($R_q/\lambda > 0.012$), что объясняется наличием более глубоких царапин (рис. 1, *f*). Анализ 2DPSD показал экстремумы на малых частотах, обусловленные ограничением данных по крупным масштабам, а также превышение (~ 1000 1/mm) спектральной плотности у М2 по сравнению с модельным образцом в широком диапазоне частот (рис. 1, *g*), что коррелирует с повышенным значением шероховатости.

Магнитореологическое полирование

Магнитореологическое полирование проводилось на модельном образце 6×6 mm из материала стали 316L(N)-IG (рис. 2, *a*) в лабораторной установке „Полимаг“, позволяющей эффективно исследовать различные составы полировальной жидкости благодаря необходимому малому объёму (~ 50 ml). Исходная поверхность после абразивной обработки кругом Р240 (размер зерен $50\text{--}63\text{ }\mu\text{m}$) имела выраженные разнонаправленные царапины глубиной $50\text{--}200$ nm и параметры шероховатости $R_q = 63.3$ nm, $R_z = 335$ nm.

Влияние состава магнитореологической полировальной жидкости (МРПЖ) и режимов обработки (мягкий/жесткий) исследовалось экспериментально. Полировальный режим определялся зазором между кюветой и образцом: при уменьшении зазора (2 mm) возрастала интенсивность съема материала („жесткий“ режим) за счёт концентрации магнитных частиц у поверхности, однако возрастал и риск появления глубоких дефектов. „Мягкий“ режим (зазор ~ 4 mm) обеспечивал более щадящую обработку.

В ходе работы изучено влияние состава магнитореологической полировальной жидкости (МРПЖ) на качество полировки стали 316L(N)-IG. Наилучшие результаты получены с составом МРПЖ №5 на основе мелкодисперсного железного порошка ($R_q = 0.18$ nm) в „жестком“ режиме (рис. 2, *b*); поверхность однородна, с выраженной поликристаллической структурой без признаков шаржирования. Наихудшее качество получено с составом МРПЖ №4 на основе этиленгликоля ($R_q = 16.6$ nm) в „мягком“ режиме (рис. 2, *c*); множественный питтинг и отсутствие зеренной структуры, что указывает на неустойчивость процесса из-за агломерации частиц, неподходящей вязкости или неблагоприятном химическом воздействии. Метод магнитореологического полирования обеспечивает достижение требуемого критерия $R_q/\lambda < 0.012$ на поверхности 6×6 mm стали 316L(N)-IG без образования повреждённого слоя. Процесс масштабирования процесса сопровождается переходом на 5-координатный станок МРПЖ с совершенно иной кинематикой процесса, включая схему относительного движения инструмента и заготовки, подачи полировальной суспензии. Поэтому параметры процесса не могут быть прямо перенесены на промышленные установки.

Апробация технологии на промышленной установке проводилась на образце-свидетеле №10 зеркала М2 после абразивного полирования. Технологический процесс состоял из трех последовательных циклов обработки, в результате которых был удален поверхностный слой суммарной толщиной около 800 nm (рис. 2, *d–f*). Отмечено постепенное сглаживание поверхности без формирования новых дефектов, при этом зафиксировано увеличение отдельных глубоких царапин и рост шероховатости с $R_q = 19.2$ до $R_q = 38$ nm. Полученные результаты подтверждают потенциал метода, однако его

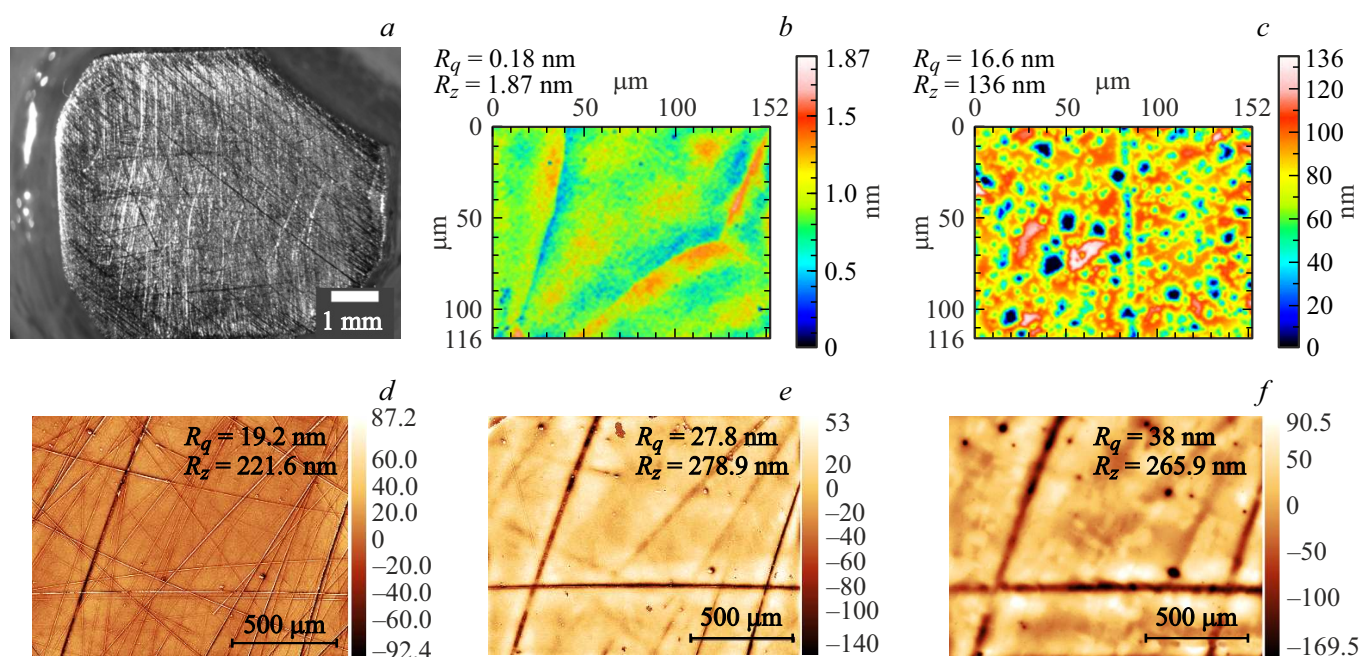


Рис. 2. (a) Фотография модельного образца 6×6 mm для отработки различных режимов МРПЖ. (b) Топография поверхности модельного образца при обработке составом МРПЖ №5, (c) составом МРЖП №4. Обработка на промышленном оборудовании образца-свидетеля №10 зеркала M2: (d) первая обработка (~ 100 nm), (e) вторая обработка (~ 350 nm), (f) третья обработка (~ 800 nm).

масштабирование требует дополнительной оптимизации и исследований.

Заключение

Результаты исследования подчёркивают необходимость точного контроля параметров полирования при изготовлении зеркал для высокоотражающих оптических систем. Характерные дефекты, такие как царапины, питтинг и оксидные включения, могут быть учтены при оценке стойкости зеркальных покрытий в условиях эксплуатации.

Обе исследованные технологии — абразивное и магнитореологическое полирование — продемонстрировали возможность достижения требуемой шероховатости поверхности $R_q/\lambda < 0.012$ на модельных образцах из нержавеющей стали 316L(N)-IG. Наилучшие характеристики получены при использовании состава МРПЖ №5 $R_q/\lambda < 0.0003$, причём структура поверхности отличалась отсутствием шаржирования. Абразивная технология также показала высокую эффективность, обеспечив целевое качество $R_q/\lambda < 0.003$. При масштабировании процесса на более крупное зеркало зафиксировано увеличение шероховатости, что указывает на необходимость дальнейшей оптимизации, включая подбор инструмента или модификацию режимов полирования. Тем не менее продемонстрированные результаты подтверждают применимость выбранных подходов и создают прочную основу для развития технологии высокоточной обра-

ботки крупногабаритной оптики из нержавеющей стали 316L(N)-IG.

В статье не затронуты альтернативные подходы, основанные на предварительном покрытии поверхности нержавеющей стали другим материалом с последующей обработкой — например, алмазное точение биметаллической конструкции CuCrZr/SS316L(N)-IG или абразивное полирование остеклованной поверхности стали SS316L(N)-IG. Выбор в пользу непосредственной обработки подложки из нержавеющей стали обусловлен стремлением к конструкционной простоте и технологической воспроизводимости, однако оценка эффективности таких комбинированных решений остаётся предметом дальнейших исследований.

Финансирование работы

Работа выполнена частично при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение FFUG-2024-0034), частично за счет средств Государственного контракта № Н.4к.241.09.23.1060 в рамках проекта ИТЭР. Микроскопия выполнена в РЦ „Микроскопии и микроанализа“ СПбГУ. Микроанализ образцов покрытия выполнен при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (шифр проекта AAAA-A19119091190094-6).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Samsonov, I. Tereschenko, E. Mukhin, A. Gubal, Y. Kapustin, V. Filimonov, N. Babinov, A. Dmitriev, A. Nikolaev, I. Komarevtsev, A. Koval, A. Litvinov, G. Marchii, A. Razdobarin, L. Snigirev, S. Tolstyakov, G. Marinin, D. Terentev, A. Gorodetsky, R. Zalavutdinov, A. Markin, V. Bukhovets, I. Arkhipushkin, A. Borisov, V. Khripunov, V. Mikhailovskii, V. Modestov, I. Kirienko, I. Buslakov, P. Chernakov, A. Mokeev, M. Kempenaars, P. Shigin, E. Drapiko. *Nucl. Fusion*, **62** (8), 086014 (2022). DOI: 10.1088/1741-4326/ac5368
- [2] R. Santos, H. Policarpo, B. Goncalves, P. Varela, E. Nonbol, E. Klinkby, B. Lauritzen, Y. Romanets, R. Luis, P. Vaz. In: *Proc. of the 4th Int. Conf. on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications* (ANIMMA, 2015), p. 950. DOI: 10.13140/RG.2.1.5173.0001
- [3] M. Joanny, S. Salasca, M. Dapena, B. Cantone, J. Travère, C. Thellier, J. Fermé, L. Marot, O. Buravand, G. Perrollaz, C. Zeile. *Rev. Sci. Instrum.*, **83** (10), 10E506 (2012). DOI: 10.1063/1.4731004
- [4] I. Kirienko, I. Buslakov, V. Modestov, I. Murtazin, E. Mukhin, A. Litvinov, A. Koval, D. Samsonov, V. Senichenkov, G. Marinin, D. Terentyev, P. Andrew. *Fusion Eng. Des.*, **146**, 2624–2627 (2019). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2019.04.058
- [5] H. Bennett. *Opt. Soc. Am.*, **51** (2), (1961). DOI: 10.1364/josa.51.000123
- [6] А.П. Митрофанов, К.А. Паршева. *Вестник машиностроения*, **6**, 75–79 (2017).
- [7] А.П. Митрофанов, К.А. Паршева. *Физикохимия поверхности и защита материалов*, **56** (3), 330–336 (2020). DOI: 10.31857/S0044185620030249
- [8] X. Hu, Z. Song, W. Liu, F. Qin, Z. Zhang, H. Wang. *Appl. Surf. Sci.*, **258** (15), 5798–5802 (2012). DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.02.100
- [9] W. Liao, Y. Dai, Z. Liu, X. Xie, X. Nie, M. Xu. *Opt. Express*, **24** (4), 4247 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.004247
- [10] J. Yin, Q. Bai, B. Zhang, J. Chin. *Mech. Eng.*, **31** (1), 41 (2018). DOI: 10.1186/s10033-018-0229-2
- [11] А.В. Рогов, Ю.В. Капустин, В.М. Гуреев, А.Г. Домантовский. *Поверхность, рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования*, **6**, 25–32 (2021). DOI: 10.31857/S1028096021060121
- [12] A.E. Gorodetsky, A.V. Markin, V.L. Bukhovets, V.L. Voytitsky, T.V. Rybkina, R.Kh. Zalavutdinov, V.I. Zolotarevsky, A.P. Zakharov, I.A. Arkhipushkin, L.P. Kazansky, A.M. Dmitriev, A.G. Razdobarin, D.S. Samsonov, E.E. Mukhin. *J. Surf. Investig. X-Ray Synchrotron Neutron Tech.*, **14** (5), 1003–1015 (2020). DOI: 10.1134/S1027451020050298
- [13] А. Худолей. *Наука и инновации*, **11** (189), 31–39 (2018).
- [14] A. Sidpara, M. Das, V. Jain. *Mater. Manuf. Process.*, **24** (12), 1467–1478 (2009). DOI: 10.1080/10426910903367410
- [15] M. Kumar, H. Singh Yadav, A. Kumar, M. Das. *Micro-manufacturing*, **5** (2), 82–100 (2022). DOI: 10.1177/25165984211008173
- [16] M. Tricard, W. Kordonski, A. Shorey, C. Evans. *CIRP Ann.*, **55** (1), 309–312 (2006). DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60423-5
- [17] N. She, T. Gong, B. Chen, M. Lu, Y. Xu, X. Peng. *Mech. Sci.*, **14** (1), 179–191 (2023). DOI: 10.5194/ms-14-179-2023