

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК

ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ И СКОРОСТЬ СНЯТИЯ МАТЕРИАЛА ПРИ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ ДОВОДКЕ БЕЗ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ

© 2005 г. Н. В. Cheng* (Dr), Z. J. Feng* (Dr), Y. W. Wang** (Dr)

* Факультет точного приборостроения, Университет Цингуа, Пекин, Китай

** Чангчунский институт оптики, точной механики и физики, Китайская академия наук,
Чангчун, Китай

E-mail: chenghb@tsinghua.edu.cn; chenghaobo@tsinghua.org.cn

Описана новая технологическая методика, так называемая магнитореологическая доводка (МРД), основанная на компьютерно-управляемой обработке оптических поверхностей, которая сочетает в себе особенности обычной обработки несвязанным абразивом с характеристиками, задаваемыми полировальным кругом и намагничиванием. На основе теоретических предпосылок разработаны и проведены эксперименты по определению скорости снятия материала на параболическом зеркале с целью выяснения влияния контролируемых параметров: величины зазора между обрабатываемым изделием и полировальным кругом, скорости вращения полировального круга, объемной концентрации фракции немагнитных частиц и времени полирования. Выполнены эксперименты по изучению микроструктуры поверхности обрабатываемого изделия и конечной шероховатости поверхности, доведенной от начальной среднеквадратичной величины 10,98 до 1,22 нм после 20-минутной МРД, что свидетельствует о быстром выходе на наноразмерный уровень. Отсутствие подповерхностных повреждений полированной поверхности подтверждает практическую целесообразность методики МРД.

Коды OCIS: 240.5770.

Поступила в редакцию 12.11.2004.

1. Введение

Асферические оптические элементы являются важными компонентами современных оптических систем [1]. Существует много типов асферики. Обычно используются параболические, эллипсоидальные и др. [2]. В последнее время возрастающие требования к асферическим оптическим элементам (например, для литографии) наряду с расширением областей применения (конформная оптика) вызывают острую потребность в методах оптической доводки, которые могут применяться локально для полирования асферических оптических деталей сложной формы, изготовленных из хрупких материалов (например, стекла) [3]. В результате изготовление высокоточных асферических поверхностей все еще является трудоемким процессом. После того как на отрезном станке делается очень низкоточная заготовка для получения детали, близкой к желаемой по форме, в классическом процессе доводки опытный оптик выполняет большую часть работы вручную и обычно использует притир

точной формы – традиционный жесткий притир из смолы или полиуретана [4]. Тем самым давление передается через абразивную суспензию на всю поверхность материала детали. Материал затем удаляется за счет химического и механического взаимодействий между абразивом и деталью. Однако скорость удаления материала мала и поэтому время изготовления высокоточных оптических элементов оказывается большим [5]. В настоящее время асферические оптические поверхности обычно доводятся путем компьютерно-управляемого полирования с использованием субапертурных полировальников [6–8]. В компьютерно-управляемом полировании применяется традиционный процесс доводки несвязанным абразивом с контролируемой нагрузкой полирования [9]. Это – процесс истирания незакрепленным абразивом, находящимся в контакте с двумя поверхностями, в котором частицы абразива (взвешенные в жидкости) прижимаются к оптической поверхности с помощью деформируемого полировальника и материал удаляется в результате химико-механического процесса [10]. Альтернативный

процесс представляет собой упругоэмиссионную обработку [11] – процесс плавающего полирования [12] с минимизацией площади контакта между полировальником и обрабатываемой поверхностью, в котором полировальник плавает на слое жидкости, содержащем частицы абразива. Толщина слоя жидкости составляет величину, кратную диаметру частиц абразива [13], определяющими параметрами процесса являются гидравлическое давление, оказываемое полировальником, и кинетическая энергия абразива. При требованиях к среднеквадратичной шероховатости поверхности менее 1 нм, обычно предъявляемых к сверхгладкой оптике, технические спецификации для оптических элементов зачастую превышают возможности промышленного высокоскоростного станочного парка [14].

В данной статье представлена новая методика субапертурного полирования и формообразования – магнитореологической доводки (МРД), которая разработана для преодоления ограничений существующего метода МРД, в основном применявшегося для полирования средне- или малоразмерных оптических элементов [15]. Отличительной особенностью разработанной системы МРД являются небольшой полировальный круг, который вращается вокруг своей горизонтальной оси, а сама ось вращается вокруг центра круга в горизонтальной плоскости. Круг смонтирован так, чтобы сканировать находящуюся под ним деталь как субапертурный инструмент, и особенно подходит для полирования асимметричных деталей, таких как конформные линзы и линзы произвольной формы. Деталь устанавливается на поворотном столе обрабатываемой поверхностью вверх, что помогает уменьшить инерцию вращения при полировании больших деталей. Ма-

тематическая модель доводки оптики для новой системы МРД создана на основе уравнения Престона [16], затем были промоделированы особенности функции съема материала и выполнены эксперименты для проведения анализа процесса полирования оптических элементов по методу МРД.

2. Технология магнитореологической доводки асферических поверхностей

В системе МРД магнитно-загущенная магнитореологическая (МР) жидкость протекает через заданный сужающийся зазор, образованный поверхностью детали и движущейся жесткой стенкой, производя прецизионное снятие материала и полировку. Основным преимуществом МРД по сравнению с традиционной полировкой является то, что полировальный инструмент не изнашивается, так как рециркулирующая жидкость непрерывно контролируется и удерживается. Поэтому во время полирования функция съема материала не меняется, что удобно для управления процессом полирования. Из вышеприведенного описания понятно, что имеются два предварительных условия для успешной МР доводки: подходящий градиент магнитного поля и приготовление МР жидкости с хорошей реологией.

2.1. Инструмент для МРД и его структура

На рис. 1а и 1б показаны структура кругового полировального инструмента и размещение магнитов на инструменте, которые установлены в разработанной системе МРД. При работе круговой полировальный инструмент приводится во вращение одним из моторов через ременную передачу по оси его собственно-

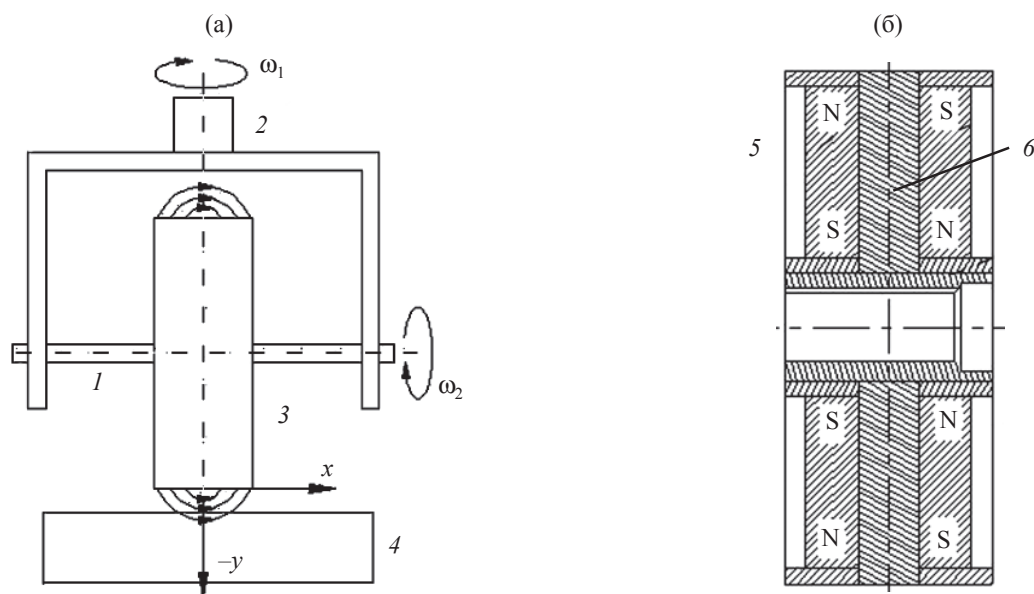


Рис. 1. Схемы кругового полировального инструмента (а) и размещения магнитов (б). 1 – ось собственного вращения, 2 – внешняя ось вращения, 3 – полировальный круг, 4 – деталь, 5 – магнит, 6 – магнитозащитная пластина.

го вращения и одновременно другой мотор вращает полировальный круг, который имеет ось, вращающуюся в том же направлении. Таким образом, материал с поверхности детали может удаляться благодаря движению собственного вращения. С другой стороны, движение вращения в том же направлении также непрерывно изменяет рабочую орбиту, что является новаторской особенностью системы. Магниты распределены по обе стороны магнитозащитной пластины симметрично, как показано на рис. 1б, для того чтобы магнитные линии пересекали рабочий зазор между полировальным кругом и деталью, выдерживая направление градиента магнитного поля как можно более перпендикулярным к поверхности детали.

2.2. Принцип и модель МРД

Как показано на рис. 2, во время полирования деталь погружается в МР жидкость на фиксированном расстоянии от полировального круга. Когда МР жидкость поступает в рабочий зазор между деталью и полировальным кругом, она становится более жесткой под действием градиента магнитного поля и превращается в пластичную среду Бингхэма. Соответственно, сдвиговый поток пластичной МР жидкости оказывает большое давление на часть поверхности детали, что приводит к сдвигу материала. Участок, в котором происходит сдвиг материала, мал вследствие малого диаметра полировального круга и представляет собой почти точечный контакт, который называется пятном полирования.

Математическая модель МРД разработана на основе уравнения Престона, которое является общепринятым в оптическом производстве. Согласно Престону, скорость снятия материала

$$L(x, y) = KP(x, y)V(x, y), \quad (1)$$

где K – коэффициент Престона, P – давление на поверхности детали в пятне полирования и V – скорость МР жидкости в пятне полирования. В этой модели P является очень сложным параметром, состоящим из гидродинамического давления P_f и магнитного давления P_m . МР жидкость несжимаема и магнитным деформационным давлением можно пренебречь, поэтому магнитное давление в основном создается намагничиванием. Отсюда выражение для P следующее [17]:

$$P = P_m + P_f. \quad (2)$$

Для кругового полировального инструмента, изображенного на рис. 1, линии магнитного поля вблизи магнитозащитной пластины могут быть построены теоретически, как показано на рис. 3, и выражение для распределения напряженности магнитного поля имеет вид

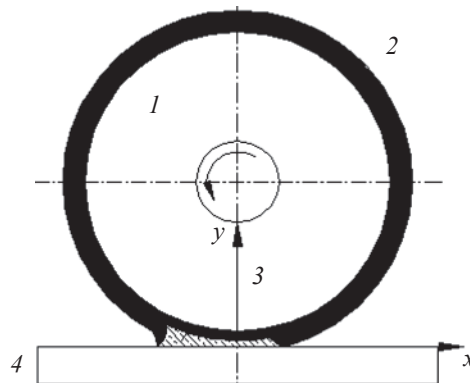


Рис. 2. Принципиальная схема МРД. 1 – полировальный круг, 2 – МР жидкость, 3 – сдвиговый поток МР жидкости, 4 – деталь.

$$H = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(\beta_n x) e^{-\beta_n y} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\beta_n x) e^{-\beta_n y}, \quad (3)$$

где

$$A_n = K_n \beta_n = \frac{2B_g \sin(\beta_n a)}{\pi(2n-1)\mu_0},$$

$$\beta_n = (2n-1)\pi/2b,$$

$$K_n = \frac{4bB_g \sin(\beta_n a)}{\pi^2 (2n-1)^2 \mu_0}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Здесь H – напряженность магнитного поля, n – порядковый номер итерации; A_n , β_n , K_n – коэффициенты, a – полуширина магнитозащитной пластины, b – полуширина полировального круга, B_g – напряженность магнитной индукции, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума. В магнитном поле магнитные частицы будут агрегироваться. С учетом сил взаимодействия сферическая частица карбонильного железа с радиусом r и магнитной проницаемостью μ_p приобретает магнитный момент [18]

$$m = 4\pi\mu_0\mu_f r^3 \frac{\mu_p - \mu_f}{\mu_p + 2\mu_f} H, \quad (4)$$

где μ_f – магнитная проницаемость жидкости-основы. При объемной доле Φ магнитных частиц в МР жидкости намагниченность жидкости-основы [19]

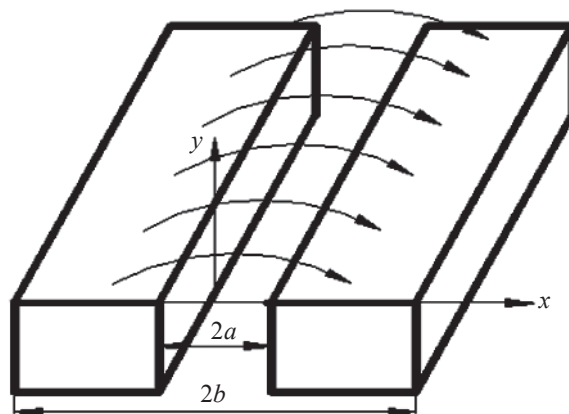


Рис. 3. Картина магнитного поля.

$$M_f = \phi M = m/V = 3m/4\pi r^3. \quad (5)$$

Магнитное давление P_m может быть выражено в виде

$$P_m = \mu_0 \int_0^H M_f(H) dH = 3\phi \mu_0 \mu_f \frac{\mu_p - \mu_f}{\mu_p + 2\mu_f} \int_0^H H dH. \quad (6)$$

При заданных минимальном расстоянии между полировальным кругом и обрабатываемой деталью h_m и R – радиусе полировального круга гидродинамическое давление P_f согласно теории гидродинамической смазки [20]

$$\frac{dP_f}{dx} = 6\eta U \frac{h - h^*}{h^3} = 6\eta U \frac{2Rh_m + x^2 - 2Rh^*}{2Rh^3}, \quad (7)$$

где h – расстояние от полировального круга до произвольной точки на поверхности детали, U – линейная скорость полировального инструмента, η – исходная вязкость МР жидкости и h^* – расстояние от точки на поверхности детали, в которой гидродинамическое давление максимально, до сдвигового потока жидкости. Пусть

$$L = K \left\{ 3\phi \mu_0 \mu_f \frac{\mu_p - \mu_f}{\mu_p + 2\mu_f} \int_0^H H dH + \frac{0,32275}{8} \left(\gamma + \frac{\pi}{2} \right) - \frac{0,22575 \sin 2\gamma}{4} - \frac{1,22575 \sin 4\gamma}{32} \right\} V. \quad (9)$$

Для учета основного положения Престона о том, что в случае полирования функция съема материала с пиком в центре и довольно гладким спадом до нуля, обеспечивающая быстрое доведение оптической поверхности детали до желаемого качества [21], должна иметь гауссово распределение при компьютерно-управляемой обработке оптических поверхностей, были исследованы характеристики полученной из (9) функции съема материала. Результаты показаны на рис. 4: полученная функция количественно согласуется с требуемым гауссовым стандартом.

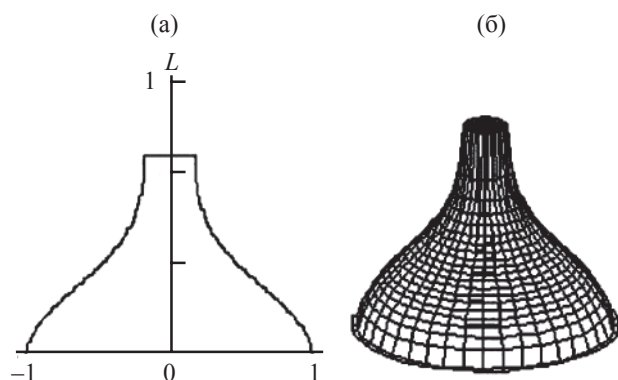


Рис. 4. Гауссов профиль функции съема. а – сечение $L(xy)$; б – 3D-профиль.

$$\operatorname{tg} \gamma = x / \sqrt{2Rh_m}, \quad \overline{P_f} = \frac{h_m^2 P_f}{6\eta U \sqrt{2Rh_m}},$$

где γ – угол между касательной к сдвиговому потоку МР жидкости и поверхностью детали. При граничных условиях

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= -\pi/2 \quad (x = -\infty), \\ \gamma^* &= 25^\circ 25', \quad P_f = 0, \quad dP_f/dx = 0, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\overline{P_f} = \frac{0,32275}{8} \left(\gamma + \frac{\pi}{2} \right) - \frac{0,22575 \sin 2\gamma}{4} - \frac{1,22575 \sin 4\gamma}{32}.$$

Таким образом, получено распределение давления на поверхности детали в двумерных координатах.

3. Моделирование функции съема материала

Подставляя (6) и (8) в (1), получаем скорость съема материала

4. Эксперимент

4.1. Особенности скорости съема материала

Проведено исследование результатов воздействия МРД. Рассмотрены такие параметры, как размер зазора между деталью и полировальным кругом, скорость его вращения, объемная концентрация доли немагнитных частиц и время полирования. В качестве исследуемой детали было выбрано параболическое зеркало из стекла К9 ($K = 4,8 \times 10^{-13} \text{ м}^2/\text{Н}$). Рабочие условия были следующие: плотность магнитного потока $B_g = 0,32 \text{ Тл}$, соотношение объемных концентраций компонентов в масляной МР жидкости-основе – 26,18% частиц карбонильного железа (магнитная проницаемость $\mu_p = 1500$), 61% масла, 2,82% стабилизатора (силиконового масла).

Значения экспериментальных параметров представлены в таблице. Как видно из рис. 5, скорости съема материала, измеренные с помощью координатно-измерительной машины с разрешением 0,1 мкм, оказались зависящими от четырех параметров: величины зазора, скорости полировального круга, объемной доли окиси церия (CeO_2) и времени полирования. В зависимости от величины зазора наблю-

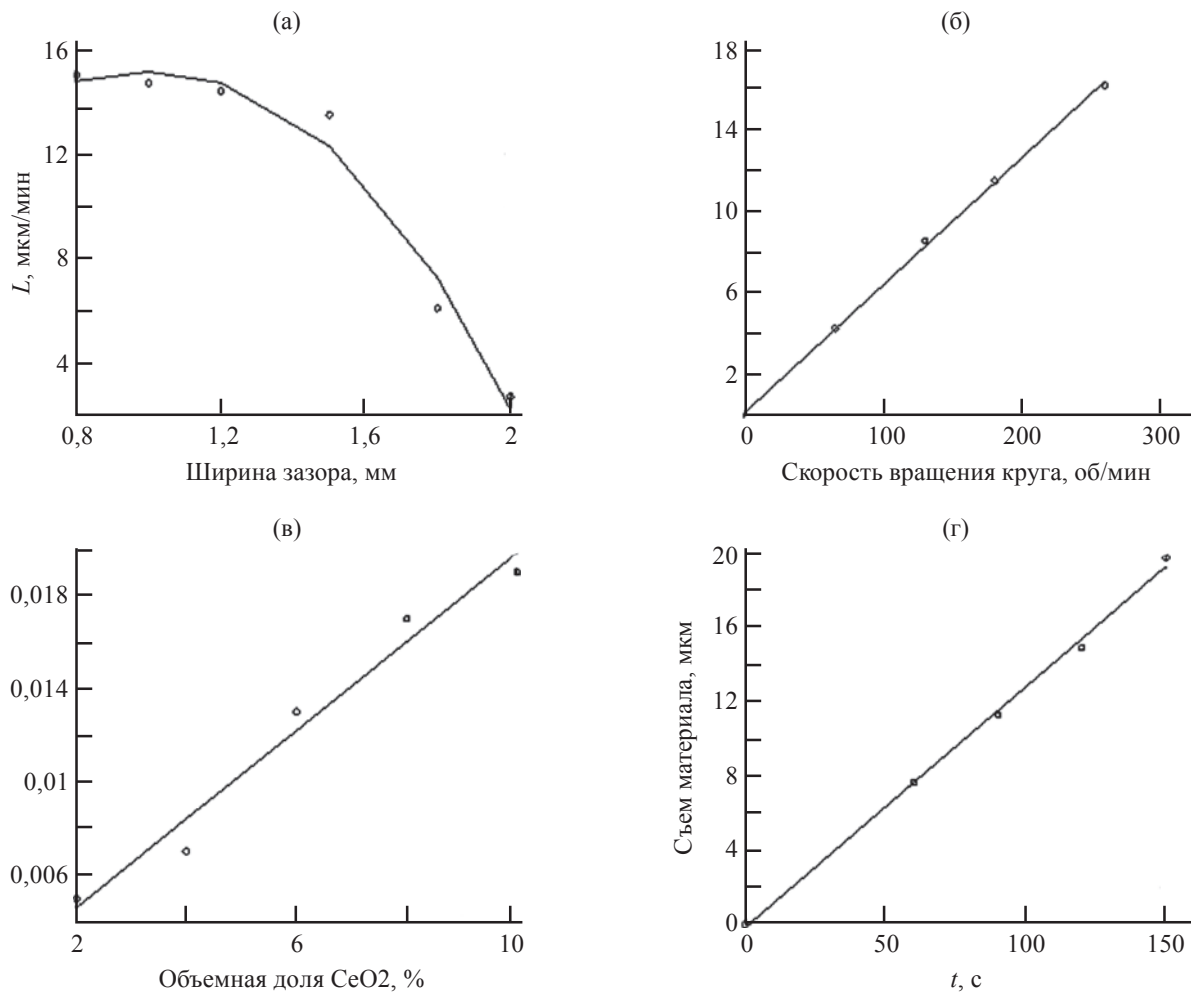


Рис. 5. Экспериментальные зависимости характеристик съема материала от параметров методики МРД.

Условия эксперимента

Размер зазора, мм (6 циклов)	Скорость вращения инструмента, об/мин (5 циклов)	Объем CeO_2 , % (5 циклов)	Время, с/цикл (5 циклов)
0,8–2	180	6	120
1	0–260	6	120
1	180	2–10	120
1	180	6	0–150

дается быстрое убывание скорости съема материала с его уменьшением, и она почти линейно пропорциональна трем другим параметрам.

4.2. Особенности функции съема материала

Для четкого понимания характеристик съема материала в процессе реального полирования необходимо провести фиксированно-точечный эксперимент при заданных условиях. Только таким путем может быть достигнут правильный результат, соответствующий практической ситуации. В соответствии

с такой постановкой, были определены следующие экспериментальные параметры: радиус полировального круга 33 мм, размер зазора 1 мм, исходная вязкость полировальной жидкости 0,5 Па, магнитная восприимчивость частиц карбонильного железа 1500, скорость вращения полировального круга 180 об/мин и время полирования 2 мин.

Установленные с помощью профилометра Wyko свойства распределения съема материала, как показано на рис. 6, представляют собой острую гауссову характеристику с высоким пиком в центре, а плавно расходящиеся крылья также отражают свойство устойчивого съема, характерного для метода МРД. Способность МРД снимать материал с поверхности необходима, но недостаточна для завершения коррекции формы: МРД должна также быстро сглаживать шероховатость поверхности. На рис. 7 показана эволюция шероховатости поверхности, измеренной посредством метода неконтактной оптической профилометрии, в зависимости от времени доводки. Были применены два метода для демонстрации возможностей сглаживания предложенной системой МРД. Для первого метода – с собственным

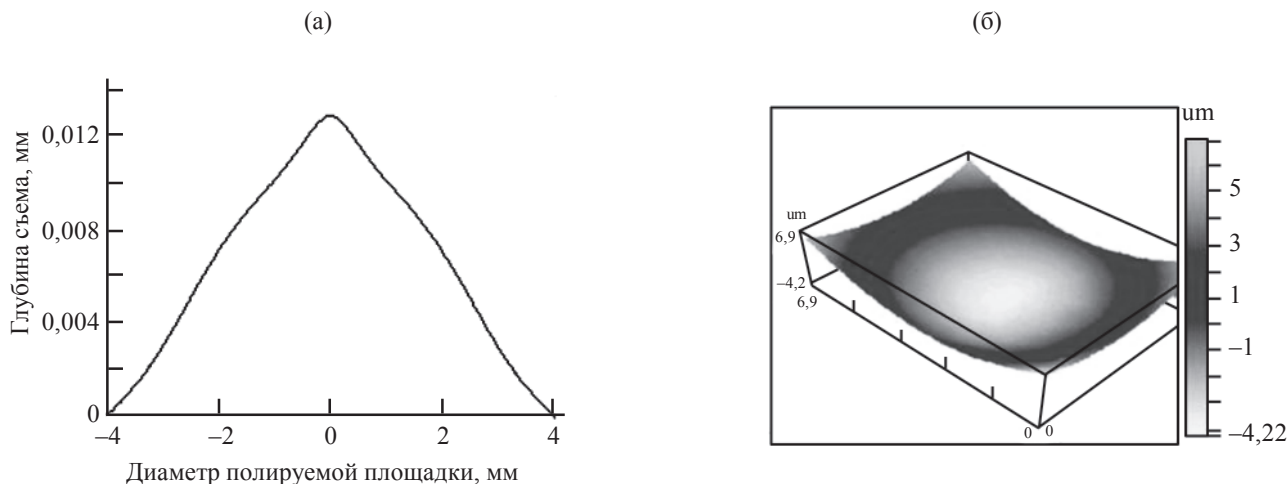


Рис. 6. а – график функции съема. б – 3D-профиль полируемой площадки.

вращением полировального круга вокруг своей оси без вращения самой оси и с одновременным вращением детали на поворотном столе с постоянной скоростью – результаты представлены кривой 1 на рис. 7. Во втором методе собственное вращение полировального круга сочеталось с относительно низкоскоростным вращением его оси – полученные результаты сглаживания представлены кривой 2 на рис. 7. Процесс сглаживания чувствителен к размеру абразива CeO_2 . Как видно из рис. 7а, при использовании этих двух методов МР жидкость, содержащая частицы CeO_2 с размером 1 мкм, не обеспечивает хорошего сглаживания. Для уменьшения шероховатости поверхности МР жидкость была подогнана заменой размера зерен CeO_2 с 1 на 0,3 мкм. Вне зависимости от обоих методов конечная среднеквадратичная шероховатость оказалась равной примерно 1 нм. Однако время доводки шероховатости во втором методе уменьшилось с 30 до 20 мин, что иллюстрирует рис. 7б.

Для дальнейшего анализа микроструктуры детали из стекла К9 после МРД МР жидкость, содержащая

зерна CeO_2 с размером 0,3 мкм, была использована для полирования. Различия в рис. 8а и 8б иллюстрируют значительное уменьшение шероховатости поверхности детали (от $R_a = 10,98$ нм до $R_a = 2,31$ нм) после 10-минутного применения МРД. Это также подтверждает, что МРД быстро удаляет материал. Однако при более тщательном рассмотрении микроструктуры поверхности зеркала после МРД (рис. 8б) можно обнаружить негладкие переходы между высокими и низкими точками. Для устранения этого эффекта был использован второй цикл полирования в течение 10 мин, его результаты показаны на рис. 8в. Шероховатость поверхности снизилась до $R_a = 1,22$ нм и большие возвышенные области были в значительной степени удалены.

Для проведения анализа подповерхностных повреждений на исследуемой детали в результате МРД после полирования в течение 20 мин деталь, показанная на рис. 8в, погружалась на 2 ч в 2-процентную плавиковую кислоту. Результат, показанный на рис. 8г, демонстрирует, что нет большого различия в шероховатости до и после погружения (измене-

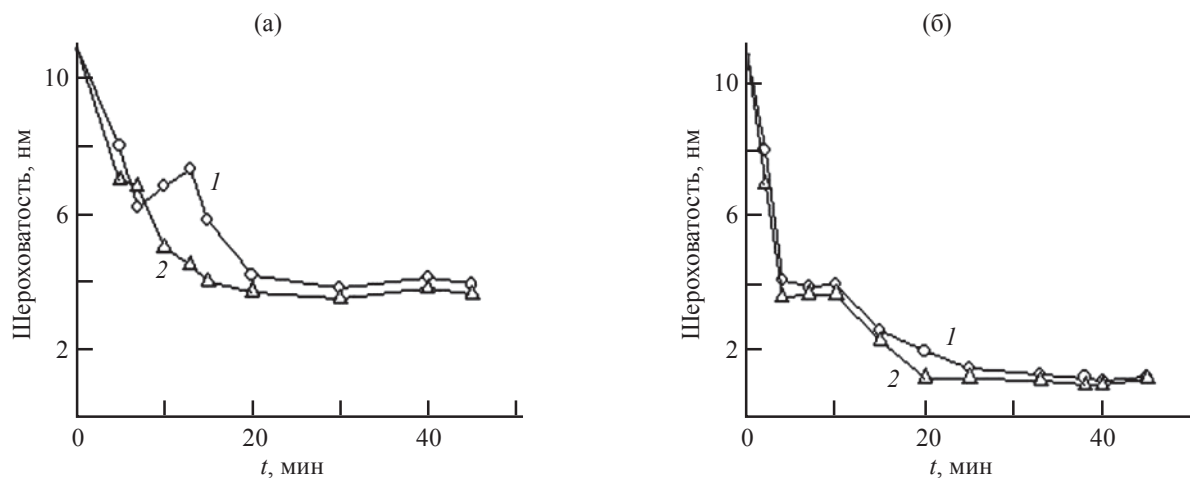


Рис. 7. Зависимости среднеквадратичной шероховатости от времени доводки. Размеры абразива 1 (а) и 0,3 мкм (б). 1 – доводка по методу 1, 2 – доводка по методу 2 (пояснения в тексте).

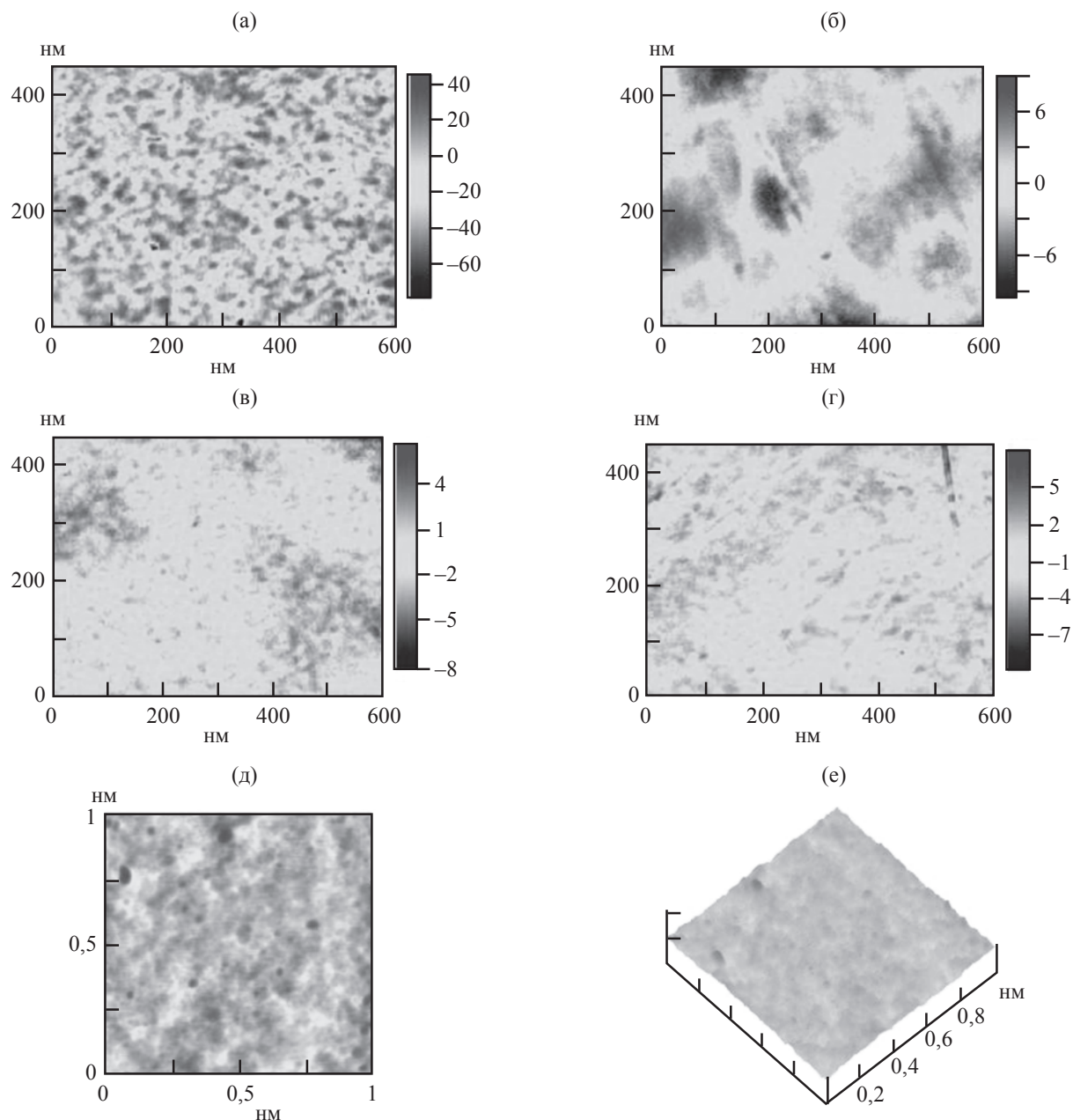


Рис. 8. Изменение микроструктуры детали из стекла К9 в процессе МРД. а – шероховатость до применения МРД ($R_a = 10,98$ нм); б – после 10 мин полировки ($R_a = 2,31$ нм), в – после 20 мин полировки ($R_a = 1,22$ нм), г – после воздействия плавиковой кислоты ($R_a = 1,25$ нм), д – коротковолновая шероховатость после МРД ($R_a = 0,536$ нм), е – 3D-вид коротковолновой шероховатости.

ние от $R_a = 1,22$ нм до $R_a = 1,25$ нм). Это свидетельствует о том, что метод МРД позволяет получать практически неповрежденную поверхность.

Остаточная коротковолновая шероховатость поверхности исследуемой детали после МРД также является важным оценочным показателем, восприимчивым к применимости метода МРД в области коротковолновой оптики, где требуются сверхгладкие поверхности. Измерения с помощью атомно-силового микроскопа, проведенные на образце с площадью 1×1 мкм (рис. 8д и 8е), показывают, что коротковолновая шероховатость поверхности детали после МРД удовлетворяет требованиям для ее ис-

пользования в оптике. Это является убедительным примером, подтверждающим практическую целесообразность применения методики МРД.

5. Заключение

Предложена новая методика – магнитореологическая доводка при компьютерно-управляемой обработке оптических деталей – для получения высокоточных поверхностей без подповерхностных повреждений. Основываясь на новой концепции, мы разработали новый круговой полировальный инструмент. Теоретически исследована функция съема

материала в отношении влияния параметров процесса, таких как гидродинамическое и магнитное давления. Результаты моделирования процесса показывают, что функция съема материала близка к реальному гауссовому распределению. На основе полученных теоретических предпосылок были разработаны и проведены эксперименты по изучению зависимости скорости съема материала на параболическом зеркале от таких контролируемых параметров, как размер зазора между деталью и полировальным кругом, скорость вращения полировального круга, объемная концентрация фракции немагнитных частиц и время полирования. Полученные результаты показали, что скорость съема материала зависит от всех указанных параметров. Проведены эксперименты по изучению микроструктуры поверхности детали после МРД. Конечная шероховатость поверхности за 20 мин МРД достигала 1,22 нм при начальном ее значении 10,98 нм при высокой скорости доводки до нанометрового уровня. Полученные результаты подтверждают перспективность новой методики МРД с компьютерным управлением процесса для производства высокоточных сверхгладких поверхностей без поверхностных повреждений при относительно высокой скорости съема материала.

Данная работа проводилась как часть проекта “Исследование магнитореологического сверхточного процесса полирования асферических линз”, финансируемого Национальным фондом естественных наук Китая (проект № 50175062).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Johnson R.B.* Wide field of view three-mirror telescopes having a common optical axis // *Opt. Engin.* 1988. V. 27. № 1. P. 1046–1050.
2. *Cheng H.B., Feng Z.J., Wu Y.B.* Fabrication of off-axis aspherical mirrors with loose abrasive point-contact machining // *Key Engin. Materials*. 2004. V 257–258. P. 153–158.
3. *Oliver W.F., Hedser V.B., Frankena H.J.* Fluid jet polishing of optical surfaces // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. № 28. P. 6771–6773.
4. *Paula G.* Automating lens manufacturing // *Mechan. Engin.* 1997. V. 119. № 3. P. 88–91.
5. *Takino H., Shibata N., Itoh H.* Computer numerically controlled plasma chemical vaporization machining with a pipe electrode for optical fabrication // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. № 22. P. 5198–5209.
6. *Jones R.A., Rupp W.J.* Rapid optical fabrication with computer-controlled optical surfacing // *Opt. Engin.* 1991. V. 30. № 1. P. 1962–1969.
7. *Doughty G., Smith J.* Microcomputer-controlled polishing machine for very smooth and deep aspherical surfaces // *Appl. Opt.* 1987. V. 26. P. 2421–2426.
8. *Negishi M., Ando M., Takimoto M.* Studies of super-smooth polishing on aspherical surfaces // *Int. J. Jpn. Soc. Prec. Engin.* 1995. V. 29. P. 1–4 (in Japanese).
9. *Kirk N.B., Wood J.V.* Glass polishing // *Br. Cream. Trans.* 1994. V. 93. P. 25–30.
10. *Suzuki H., Hara S., Matsunaga H.* Study on aspherical surface polishing using a small rotating tool-development of polishing system // *Int. J. Jpn. Soc. Prec. Engin.* 1993. V. 59. № 10. P. 1713–1717 (in Japanese).
11. *Mori Y., Yamauchi K., Endo K.* Elastic emission machining // *Int. J. Prec. Engin.* 1987. V. 9. P. 123–128.
12. *Soares S.F., Baseit D.R., Black J.P.* Float-polishing process and analysis of float-polished quartz // *Appl. Opt.* 1994. V. 33. P. 89–95.
13. *Mori Y., Yamauchi K., Endo K.* Mechanism of atomic removal in elastic emission machining // *Int. J. Prec. Engin.* 1988. V. 10. P. 24–28.
14. *Golini D.* Magnetorheological finishing automates precision optics fabrication // *Laser Focus World*. 1998. V. 34. № 9. P. 187–190.
15. *Pollicove H.M.* Next generation optics manufacturing technologies // *Proc. SPIE*. 2000. V. 4231. P. 8–15.
16. *Preston F.W.* // *J. Soc. Glass Technol.* 1927. V. 11. P. 214–256.
17. *Kordonski W.I., Jacobs S.D.* Magnetorheological finishing // *Int. J. Mod. Phys.* 1996. V. 10. P. 2837–2848.
18. *Lemaire E., Menunier A., Bossis G.* Influence of the particle size on the rheology of magnetorheological fluids // *J. Rheol.* 1995. V. 39. № 5. P. 1011–1013.
19. *Chi C., Wang Zh., Zhao P.* Iron magneto-fluid-mechanics. Beijing: Beihang University Press, 1993. P. 110–119 (in Chinese).
20. *Yang P.* Numeric analysis of fluid lubrication. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. P. 29–36 (in Chinese).
21. *Jones R.A.* Optimization of computer controlled polishing // *Appl. Opt.* 1977. V. 16. № 1. P. 218–224.