

# ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 62-408 535 532.5

## МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2012 г. В. И. Кордонский, доктор техн. наук; С. Р. Городкин, канд. техн. наук

QED Technologies International, Рочестер, Нью-Йорк, США (www.qedmrf.com)

E-mail: kordonski@qedmrf.com

В работе обсуждается широко используемый в производстве точной оптики принцип магнитореологического (МР) полирования, а также приведены результаты обработки оптических деталей сложной формы. В теоретической части, применительно к методу МР полирования, рассматривается концепция уноса материала с обрабатываемой поверхности, основанная на принципе сохранения импульса частицами бинарной абразивной суспензии. Согласно предлагаемой модели нормальные к поверхности силы, требуемые для внедрения абразивных частиц в полируемый материал, обеспечиваются за счет их взаимодействия у поверхности с более массивными базисными (магнитными) частицами, которые в сдвиговом потоке концентрированной суспензии подвержены флуктуациям и обмениваются импульсом с абразивными частицами.

*Ключевые слова:* магнитореологическое полирование, магнитореологическая полировальная жидкость, унос материала, моделирование, гранулярное течение.

Коды OCIS: 240.5450; 220.0220.

Поступила в редакцию 19.02.2012.

### 1. Введение

Современная оптическая промышленность базируется на передовых производственных технологиях, которые обеспечивают получение высокоточных деталей, включая оптику асферической и “свободной” формы. Примерами подобной оптики могут служить проекционные линзы, используемые в литографии при производстве интегральных микросхем с нанометровым размером элементов; оптика для лазеров, систем воздушного наблюдения, вооружения, медицинских приборов, цифровой фотографии, а также зеркала космических телескопов. Считается, что наиболее проблемным, и зачастую труднопредсказуемым, звеном в технологической цепочке производства деталей сложной формы является полировка и, в частности, так называемая фрагментарная (субапертурная) полировка, основанная на зонном удалении материала. Такой процесс требует прецизионного управления перемещением и скоростью полирующей зоны относительно поверхности.

В настоящее время это обеспечивается станками с числовым программным управлением (ЧПУ), выполняющими движение объектов в пространстве согласно доводочным алгоритмам. Все преимущества детерминированности, характерной при использовании ЧПУ, могут быть достигнуты только при условии, если зонный полировальный инструмент “мгновенно” адаптируется к форме обрабатываемой поверхности и функция уноса материала в зоне полировки определена и стабильна во времени. Традиционные механические инструменты, использующие сжатый воздух или упругие прокладки, подавливающие полировальную подложку, не обеспечивают требуемый уровень адаптивности и стабильности [1, 2].

Жидкие материалы по своей природе способны легко адаптироваться к любой форме поверхности, в связи с чем предпринимались попытки применить эти уникальные свойства для управляемого уноса материала, включая полирование [3–5]. В известных практических приложениях энергия потока маловязкой

жидкости (обычно воды) передается абразивным частицам для совершения зонной эрозии поверхности и уноса материала. В зависимости от параметров процесса, таких как скорость течения жидкости и размер абразивных частиц, режим уноса материала может меняться от интенсивной резки до мягкого полирования. Например, ранее было установлено, что абразивные водяные струи могут быть использованы для полирования таких материалов, как стекло, алмаз, керамика, нержавеющая сталь и сплавы [3]. Качество поверхности напрямую зависело от размера и угла атаки абразивных граней. Так, после обработки стекла шероховатость поверхности составляла  $Ra \approx 130$  нм, однако соответствующая корректировка параметров процесса, таких как скорость струи, размер и концентрация абразива, дала возможность уменьшить шероховатость до  $Ra \approx 1$  нм [4]. Гидродинамический принцип также применяется для проведения высокоточного полирования при “упругоэмиссионной обработке” (elastic emission machining) [5]. В данном методе нагруженный упругий полиуретановый шар полирует деталь при сканировании поверхности. Шар вращается с большой скоростью в полирующей жидкости и вследствие гидродинамических сил всплывает над поверхностью. Зазор между “плавающим” шаром и поверхностью, определяемый режимом упругогидродинамической смазки, мал по величине, однако значительно превышает размер абразивных частиц. Предполагаемый механизм уноса материала заключается в упругой бомбардировке поверхности полирующими частицами.

Принцип использования жидкой среды в качестве рабочего инструмента положен в основу технологии магнитореологического (МР) полирования [6, 7], которая в настоящее время известна под торговой маркой MRF® (magnetorheological finishing). В дальнейшем в тексте эта аббревиатура будет использоваться при рассмотрении различных аспектов МР полирования. Научные аспекты этой технологии освещены ограниченно [8, 9]. В прошлом предпринимались отдельные попытки разработать эмпирические модели, связывающие скорость уноса материала в MRF со свойствами стекла, экспериментально измеряемым давлением на поверхности или силой сопротивления, возникающей при движении детали в МР жидкости [10], либо комбинацией перечисленных факторов [11–15].

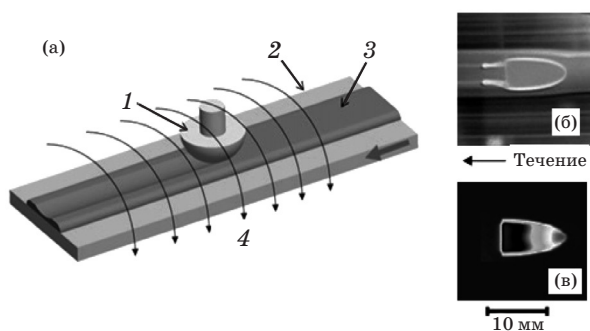
В настоящей статье предлагается новая концепция уноса материала, согласно которой зональный унос происходит в результате сдвигового течения МР жидкости, содержащей абразивные частицы [16]. Концепция базируется на принципах механики суспензий. Обсуждаются результаты моделирования, приводятся экспериментальные данные, подтверждающие справедливость модели, и демонстрируется эффективность процесса на конкретных примерах.

## 2. Основы технологии магнитореологического полирования

### 2.1. Структура технологии (процесса)

Ключевым элементом MRF-процесса является МР полирующая жидкость. Она представляет собой текучую композицию, механические свойства которой изменяются под воздействием магнитного поля таким образом, что жидкость преобразуется в пластичный материал. Обычно МР жидкость состоит из ферромагнитных частиц (размер которых, как правило, превышает 0,1 мкм в диаметре), взвешенных в несущей среде. Под воздействием магнитного поля частицы намагничиваются и, вследствие этого, выстраиваются в цепочки в объеме жидкости. Цепочки частиц образуют пространственную структуру, которая и вызывает изменение механических свойств системы, в частности, приводит к увеличению предела текучести. В отсутствие магнитного поля частицы возвращаются в дезорганизованное, или свободное, состояние и начальные свойства материала, соответственно, восстанавливаются. В общих чертах в состав полирующей МР жидкости входят четыре основных компонента: вода, магнитные частицы, абразив и химические добавки. Выбор воды в качестве несущей среды обусловлен не только тем, что водные суспензии удобны в использовании, но и тем, что благодаря своим уникальным свойствам вода служит химическим агентом при обработке стекол и силиконовых подложек. Общепринято моделировать МР жидкость в виде бингамовского пластичного материала с пределом текучести, управляемым магнитным полем [17]. Согласно этой модели деформируемый материал ведет себя подобно твердому телу, если напряжение не достигает предела текучести, и течет подобно ньютоновской жидкости, когда напряжение превышает этот предел.

Схематично MRF-интерфейс показан на рис. 1а. Выпуклая линза помещается на некотором фиксированном расстоянии от движущейся стенки таким образом, что поверхность линзы и стенка формируют сходящийся зазор. На практике движущаяся стенка представляет собой вращающееся колесо с ободом в виде секции сферы. Такая конфигурация позволяет не только формировать сходящийся зазор, но и обрабатывать детали с плоской, выпуклой или вогнутой рабочей поверхностью. Электромагнит, расположенный под движущейся стенкой, генерирует неоднородное магнитное поле, охватывающее зазор. Градиент магнитного поля ориентирован по нормали к стенке. МР полирующая жидкость подается на движущуюся стенку непосредственно над полюсами электромагнита и образует полирующую ленту. При перемещении в область действия поля лента приобретает пластические бингамовские свойства, а ее верхний слой насыщается абразивом вследствие его левитации, вызванной градиентным магнитным полем. Лента притягивается к движущейся стенке градиентом поля, протягивается через сужающийся зазор, в результате чего происходит унос материала в зоне контакта линзы с лентой. Эта контактная зона получила название “полирувальное пятно” или просто “пятно”. Два изображения полирувального пятна приведены на рис. 1. На первом (рис. 1б) показан снимок зоны контакта между тонкой неподвижной менисковой линзой и лентой МР жидкости, движущейся заодно с твердой стенкой. На втором (рис. 1в) демонстрируется интерферограмма поверхности аналогичной линзы после того, как контакт

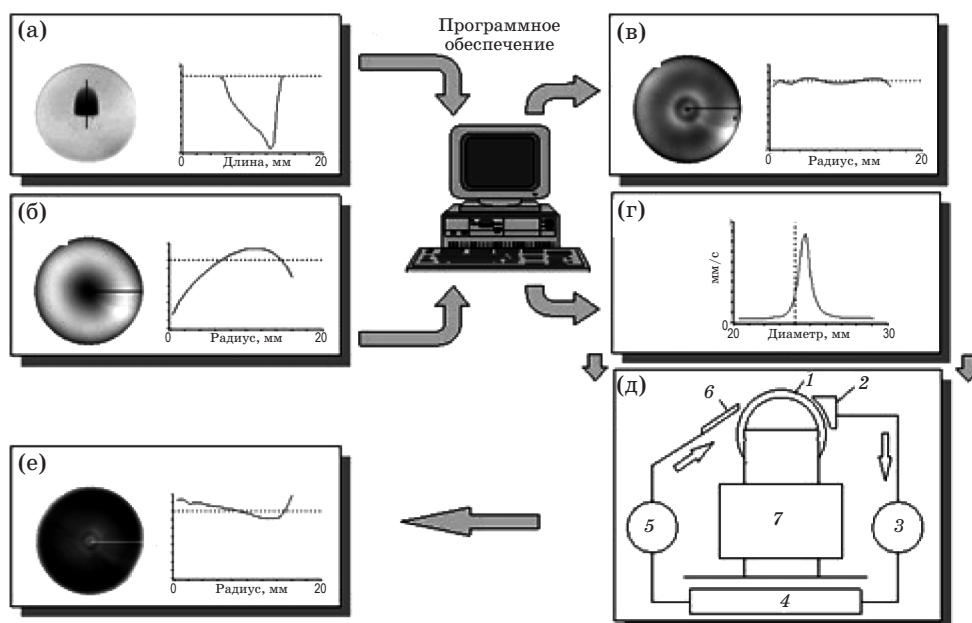


**Рис. 1.** Схематичное изображение MRF. а – MRF-интерфейс: 1 – линза, 2 – движущаяся стенка, 3 – МР жидкость, 4 – силовые линии магнитного поля; б – контактная зона; в – интерферограмма полирующего пятна.

поверхности и ленты осуществлялся в течение определенного отрезка времени. Именно таким образом получают информацию о функции распределения уноса материала в пятне, которая в дальнейшем используется для программирования режима полирования. Сравнение рис. 1б и рис. 1в показывает, что унос материала происходит в границах контактной зоны. Скорость уноса материала может устанавливаться магнитным полем, геометрическими размерами пятна (за счет изменения зазора), а также скоростью перемещения стенки. Полирование осуществляется станком с ЧПУ за счет варьирования времени контакта в соответствии с ошибкой формы поверхности детали.

Вследствие адаптивности к форме поверхности и зонной (субапертурной) природы МР полирувальный инструмент способен обрабатывать детали сложной формы, такой например, как асферическая, с непрерывно меняющейся локальной кривизной. Фундаментальным преимуществом MRF по сравнению с конкурирующими технологиями является то, что полирувальный инструмент не изнашивается благодаря постоянному контролю за параметрами циркулирующей жидкости и поддержанию их стабильными во времени. Отходы полировки и тепло непрерывно отводятся. Метод не требует специфической оснастки или инструментария. Неотъемлемыми частями MRF-процесса являются программное обеспечение, станок с ЧПУ, система подачи и рециркуляции/кондиционирования МР жидкости, а также магнитная система с встроенной поверхностью для перемещения жидкости.

Диаграмма MRF-процесса приведена на рис. 2. Входными данными для расчета программного кода полирования служат функция распределения уноса материала в пятне (рис. 2а) и интерферограмма исходной формы обрабатываемой поверхности (рис. 2б). Выходными параметрами являются управляющая программа – инструкция в виде скоростного алгоритма (рис. 2г), и прогнозируемая форма поверхности (рис. 2в). Могут осуществляться три режима обработки: равномерный унос материала, корректировка формы или комбинация этих двух режимов. Интерферограмму полирующего пятна, используемую для создания программного кода, получают на поверхности стационарной пробной линзы, идентичной обрабатываемой детали. В качестве альтернативы, заранее полученное и сохраненное пятно может быть загружено из базы данных. Исход-



**Рис. 2.** Диаграмма MRF-процесса. а – полирующее пятно (функция уноса материала); б – исходная поверхность; в – прогнозируемая поверхность; г – режим управления скоростью движения поверхности относительно пятна (временем экспозиции); д – блок-схема MRF-станка: 1 – колесо, 2 – скребок, 3 – всасывающий насос, 4 – кондиционер, 5 – подающий насос, 6 – сопло, 7 – индуктор магнитного поля; е – поверхность после полирования.

ная форма поверхности обычно представляет собой интерферограмму, несущую информацию об ошибке формы (отклонении от требуемой). Используя серию комплексных алгоритмов, компьютерная программа свертывает функцию уноса материала с функцией ошибки формы и генерирует управляющую программу для MRF-станка. Компьютерный код устанавливает расписание скорости (времени экспозиции) и необходимое количество проходов, а также определяет общее предполагаемое время обработки. Наконец, программа выдает прогноз формы поверхности, ожидаемой по завершению обрабатываемых циклов.

MRF-станок (рис. 2д) имеет вертикальное колесо 1, обод которого служит поверхностью для перемещения жидкости. Полюсные наконечники индуктора магнитного поля 7, расположенные под ободом, создают требуемые характеристики магнитного поля в зоне полирования. Система подачи МР жидкости обеспечивает непрерывную циркуляцию и снабжение зоны полирования свежей жидкостью. Система включает магнитоэкранированное сопло подачи 6 и скребок 2; подающий 5 и всасывающий 3 насосы; встроенный кондиционер 4, который снабжен сенсорами, непрерывно зондирующи-

ми параметры МР жидкости и, посредством цепи обратной связи, стабилизирующими их, предотвращая нагрев, оседание частиц и изменение влагосодержания вследствие испарения.

## 2.2. Приложения технологии

MRF может быть использована для производства практически любых видов оптики, включая наиболее сложные поверхности свободной формы, которые проблематично или невозможно точно обработать традиционными методами. Ниже приведены примеры, иллюстрирующие потенциал MRF.

Первый пример связан с изготовлением непрерывных фазовых пластин (НФП), представляющих собой оптическую поверхность свободной формы и используемых, в частности, в Американском Национальном комплексе лазерных термоядерных реакций (US National Ignition Facility, NIF), расположенном в Ливерморской национальной лаборатории им. Э. Лоуренса (Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL) в Калифорнии. Установка содержит 192 лазерных источника, лучи которых преодолевают через каскад усилителей расстояние около 300 м. Все лучи

направлены на мишень, содержащую водород. Систему планируется использовать при проведении экспериментов в области астрофизики, а также в рамках специализированных программ по разработке источников экологически чистой энергии и изучению (моделированию) поведения вещества при обслуживании и использовании ядерного оружия. Кроме того, установка будет применяться при осуществлении реакций контролируемого термоядерного синтеза с инерционным удержанием. Задача NIF состоит в возбуждении одиночной световой вспышки мощностью 500 ТВт, которая одновременно (в течение нескольких пикосекунд) достигает мишени с разных сторон. При этом для получения необходимых давления и температуры в экспериментах используются лазерные лучи, имеющие различную форму в плоскости мишени. Это достигается применением НФП, являющихся решающей и неотъемлемой частью оптической системы комплекса NIF, которые позволяют манипу-

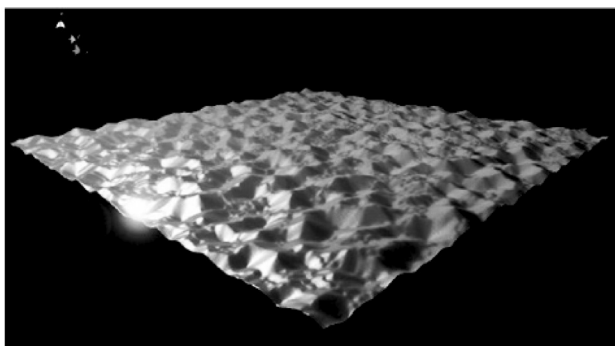


Рис. 3. Топография поверхности НФП.

лировать и управлять формой, распределением энергии и профилями волнового фронта лазерных лучей. Пластины получают путем нанесения на оптическую поверхность непрерывно меняющегося фазового профиля. Пример топографии поверхности НФП приведен на рис. 3. Основные технологические требования к качеству поверхности НФП следующие: среднеквадратическое отклонение от заданной формы – менее 20 нм; отсутствие локальных дефектов (царапин, углублений, инородных включений, приповерхностных повреждений); микрошероховатость, сопоставимая по амплитуде с длиной волны лазерного луча; поверхностная структура должна содержать элементы с продольным размером примерно от 1 до 400 мкм и порядка 5 мкм по вертикали. Нанесение подобной микроструктуры на оптическую поверхность требует применения передовых детерминистских полировальных технологий и в настоящее время осуществляется с помощью MRF. MRF-метод позволяет непосредственно наносить требуемую топографию на оптику без промежуточного использования масок и трафаретов. МР полирование обеспечивает высокую гибкость и высокую производительность процесса производства НФП, так как топографическое полирование может выполняться путем непосредственной стыковки генерируемых на компьютере интерферограмм требуемых профилей с высокой скоростью уноса материала, характерной для MRF [18].

В качестве иллюстрации на рис. 4 показаны три интерферограммы квадратного участка поверхности НФП размером 150×150 мм

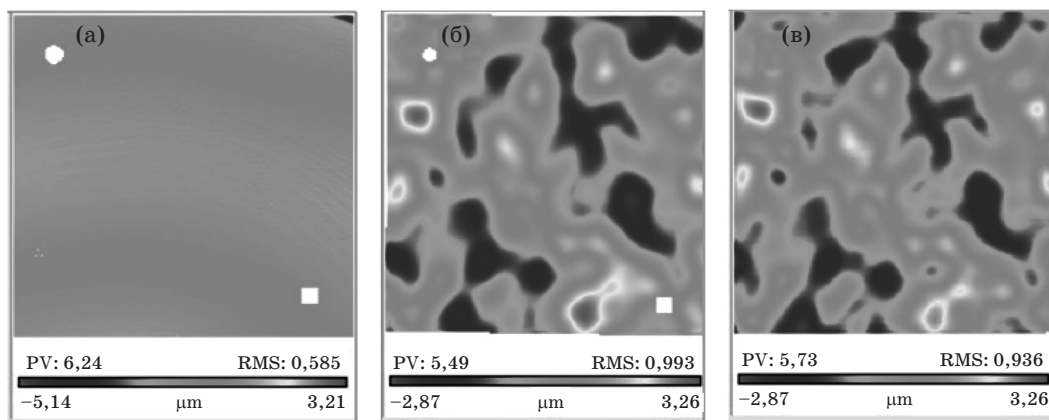


Рис. 4. Интерферограмма участка поверхности НФП. а – исходная поверхность; б – прогноз, компьютерная модель; в – эксперимент после MRF на коммерческом станке Q22-950F компании QED Technologies International.

(треть пластины). Исходная плоская поверхность представлена на рис. 4а. Требуемый профиль поверхности, выданный компьютерной программой, который должен быть нанесен на поверхность, показан на рис. 4б. Интерферограмма поверхности, полученной после MRF, приведена на рис. 4в. Среднеквадратическое отклонение (RMS) предсказанных программой и полученных при обработке данных дает значение 57 нм, что является хорошим результатом с учетом вероятных метрологических ошибок, обусловленных крутизной топографии и ограниченной продольной разрешающей способностью используемого при измерениях интерферометра (порядка 133 мкм/пиксел) [18].

Второй пример показывает возможности MRF при обработке осесимметричной оптики сложной асферической формы. Результаты полирования поверхности параболы диаметром 175 мм приведены на рис. 5. Исходная ошибка формы поверхности, характеризующая среднеквадратическим отклонением 0,46 мкм и максимальным размахом PV (Peak to Valley) 2,6 мкм, уменьшена соответственно до 0,03 мкм RMS и 0,34 мкм PV за четыре цикла, демонстрируя 15-кратное улучшение точности формы.

Представление о качестве поверхности, достигаемом посредством MRF, дает рис. 6, где измеренная с помощью атомного силового

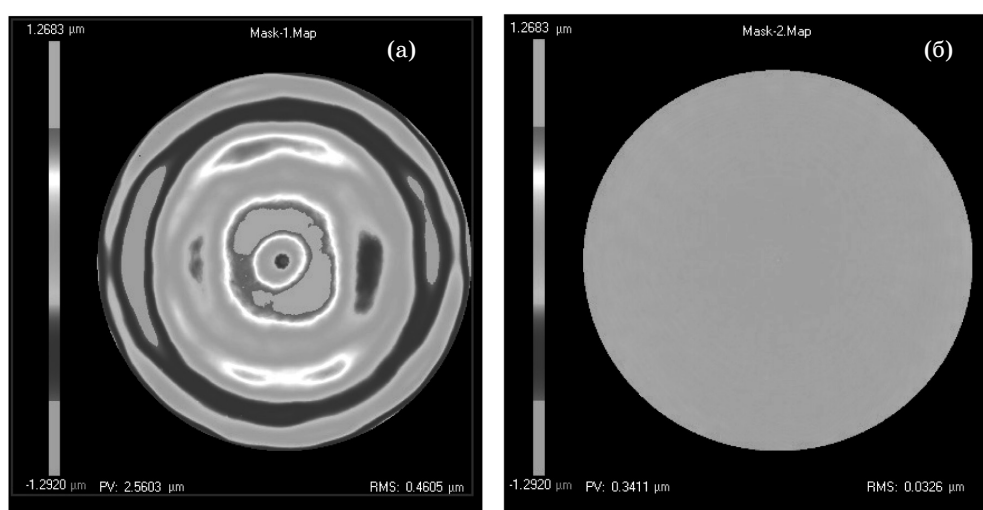


Рис. 5. Интерферограмма параболической асферической линзы. а – исходная поверхность; б – после MRF на коммерческом станке Q22-Y компании QED Technologies International.

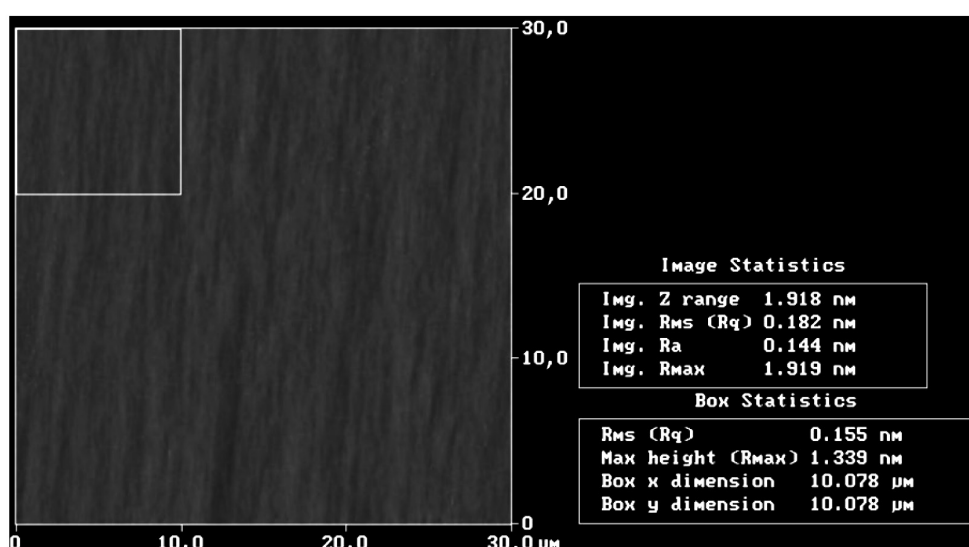


Рис. 6. Результат измерения шероховатости поверхности кварцевого стекла, обработанного с помощью MRF.

микроскопа шероховатость составляет менее 0,2 нм (RMS) и 2 нм (PV) при сканировании участка 30×30 мкм.

### 3. Моделирование уноса материала при MRF

#### 3.1. Принцип упругого полировальника

Нагрузка на абразивную частицу является ключевым моментом при анализе уноса материала абразивными суспензиями, в частности при полировании. В общем случае полирование осуществляется за счет прижатия упругого полировальника со связанными абразивными частицами к движущейся обрабатываемой поверхности. Согласно Престону [19], скорость уноса материала в этом случае пропорциональна прикладываемому давлению и скорости движения подложки относительно поверхности. Интенсивность уноса зависит также и от параметров контактной зоны, таких как механические характеристики (например упругость) полировальной подложки, которая передает индентерную нагрузку абразивной частице. Учитывая то, что МР жидкость в магнитном поле загустевает и приобретает существенные упругие свойства, вполне резонно было бы предположить, что подобный намагниченный материал может рассматриваться как подвижная полировальная подложка, аналогичная традиционному полировальному инструменту. При этом следует также сделать допущение, что напряжения, вызываемые деформацией такой подложки в сходящемся зазоре, должны быть меньше, чем предел текучести во всем объеме подложки. Для оценки справедливости такой гипотезы соответствующие механи-

ческие свойства типичной МР полировальной жидкости были измерены с помощью магнитореометра “Anton Paar MCR 301” при напряженности и ориентации магнитного поля относительно сдвига, соответствующими MRF-процессу [20]. Измерения выполнялись при напряженности магнитного поля в образце 150 кА/м и частоте колебаний ротора 1,592 Гц.

Результаты измерений модуля сдвига МР жидкости  $G'$  приведены на рис. 7а. При малых деформациях (менее 10%) намагниченная МР жидкость демонстрирует существенные упругие свойства ( $G' \approx 0,5$  МПа), которые резко уменьшаются после превышения некоторого предельного сдвига (или предела текучести), наличие которого может ассоциироваться с прочностью структуры, формируемой магнитным полем из магнитных частиц. Это означает, что в случае повышенной деформации (более 10%), характерной для развитого сдвигового течения, при которой сдвиговые напряжения превышают предел текучести и структура разрушается, наличие упругих свойств в МР жидкости не предполагается. Измеренный при малых деформациях модуль Юнга намагниченной МР жидкости составил примерно 1 МПа ( $E \approx 2G'$ ), что значительно меньше модуля традиционных подложек (50–100 МПа) [21]. Даже если допустить, что сдвиговое течение отсутствует в контактной зоне, то и в этом случае нагрузка на частицы, которая была бы достаточна для поддержания высокой скорости уноса материала, типичной для MRF (3 мкм/мин и выше на кварцевом стекле в сравнении с 0,1–0,2 мкм/мин, достигаемой обычным способом), не в состоянии генерироваться за счет деформации значительно менее упругого аналога традиционной подложки.

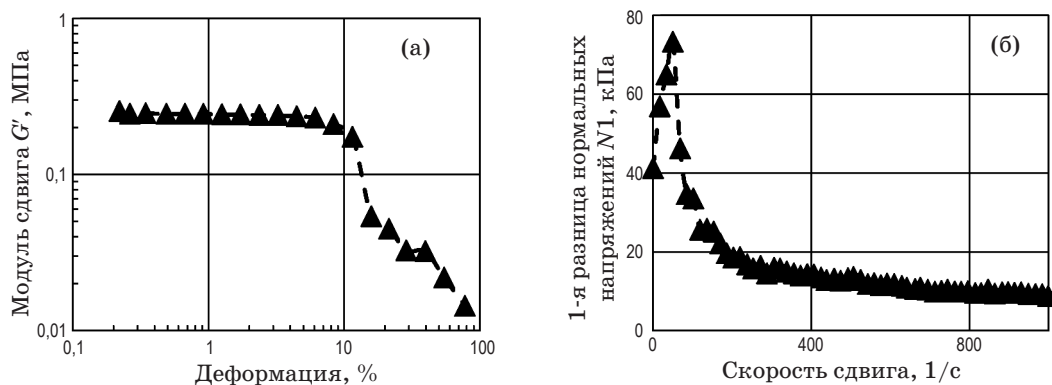


Рис. 7. Индуцируемые магнитным полем механические характеристики МР полирующей жидкости. а – модуль сдвига, б – нормальные напряжения.

Другим возможным источником нагрузки на абразивную частицу, необходимой для индентации в поверхность, могут быть нормальные напряжения, связанные с изменением морфологии структуры жидкости в результате внедрения магнитных частиц в цепочки за счет сильного диполь-дипольного взаимодействия [22]. Оценить величину этих напряжений можно используя измерения 1-й разницы нормальных напряжений МР жидкости  $N1$  с помощью магнитореометра “Anton Paar” в условиях, аналогичных приведенным выше. Результаты измерений показаны на рис. 7б. Фактические нормальные напряжения на стенке  $N1:4 \approx 5-20$  кПа значительно меньше по сравнению с напряжениями, генерируемыми традиционными подложками (80–140 кПа) при типичных давлениях на подложку 40–70 кПа и плотности выступов порядка 0,5 [21]. Таким образом, величины индуцируемых магнитным полем упругости и нормальных напряжений в МР жидкости находятся далеко за пределами диапазона механических свойств, которые в состоянии обеспечить фактическую скорость уноса материала при MRF, предполагая традиционный механизм полирования. Кроме того, как было установлено ранее [8, 11], гидродинамическое давление, генерируемое вязким течением МР жидкости в сужающемся канале, не может рассматриваться в качестве источника нагрузки на абразивные частицы.

### 3.2. Концепция сдвигового течения

Нагрузка на абразивные частицы может быть также обеспечена и за счет течения жидкости, в частности, в условиях сдвигового течения концентрированной суспензии твердых частиц. При достаточно высокой скорости сдвига такое течение сопровождается интенсивным взаимодействием частиц и их столкновением между собой и с поверхностью, ограничивающей поток. В случае бинарной (бимодальной) суспензии (и согласно принципу сохранения импульса количества движения) крупные частицы могут при столкновении передавать значительную нагрузку (импульс) мелким частицам. Когда такое столкновение происходит вблизи поверхности, это может привести к эффективной индентации мелкой частицы в поверхность, особенно если частица обладает соответствующими механическими характеристиками. Применительно к полированию эта концептуальная модель означает, что круп-

ные, или базисные, частицы воспринимают энергию сдвигового потока и снабжают малые абразивные частицы индентерной нагрузкой, требуемой для внедрения в поверхность и уноса материала. Подобный механизм уноса материала рассматривается ниже при анализе полировального процесса с использованием МР жидкости в предположении, что в полировальной контактной зоне имеет место сдвиговое течение высококонцентрированной бимодальной суспензии (порядка 50 об.%) относительно крупных магнитных частиц (микронного размера) и намного меньших абразивных наночастиц.

Отправной точкой при моделировании процесса и оценке сил, действующих на частицы, служит предположение, что динамика частиц в рассматриваемом случае совпадает с особенностями течения гранулярной среды (granular flow), описанными ранее [23–25]. В общих чертах гранулярное течение связано с движением дискретных частиц или гранул. Частицы имеют макроскопические размеры (более 1 мкм), и они не подвержены броуновскому движению. Считается, что в случае относительно малой концентрации частиц и при условии, что частицы, взвешенные в несущей среде, не сталкиваются между собой, имеет место многофазный поток. При таком течении можно допустить, что дисперсная фаза взаимодействует только с жидкой фазой. С увеличением концентрации взаимодействие частиц вступает в силу в виде мгновенных (безынерционных) столкновений, вызывающих колебание частиц и рост диссипации энергии. В этом случае устанавливается гранулярное течение.

Подход, основанный на гранулярном течении, позволяет оценить поверхностные напряжения и нагрузку на частицы, используя базовые соотношения, общепринятые для гранулярного течения, в частности, зависимость нормального напряжения на стенке от скорости сдвига. Как было установлено, при высокой концентрации твердой фазы, вплоть до 0,7, при прочих равных условиях, напряжение вначале повышается, приблизительно пропорционально квадрату скорости сдвига, затем резко падает и, в конечном итоге, становится независимым от скорости сдвига. В случае относительно умеренных концентраций нормальное напряжение на стенке принимает вид

$$\tau_{22} = K\rho_p d_p^2 \dot{\gamma}^2, \quad (1)$$

а сила, действующая на частицу, соответственно,



$$G_p = (\pi/4)K\rho_p d_p^4 \dot{\gamma}^2, \quad (2)$$

где  $\rho_p$  – плотность частицы,  $d_p$  – диаметр частицы,  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига. Безразмерный коэффициент  $K$  учитывает другие параметры течения, такие как концентрация, механические свойства частиц, демпфирующие свойства несущей жидкости, геометрию потока и т. д.

Согласно уравнению (2), задача оценки силы, действующей на частицу, в основном сводится к определению скорости сдвига потока у рассматриваемой поверхности. В приведенном ниже анализе скорость сдвига определялась численным моделированием реального сдвигового потока с учетом реологических характеристик среды. Скорость сдвига использовалась затем для вычисления силы, действующей на базисную частицу, если принять, что эта сила является нагрузкой для абразивной частицы.

В дальнейшем анализ сводится к качественному сравнению экспериментально полученных профилей уноса материала в полирующем пятне с рассчитанными профилями для поверхности, нагруженной частицами в контактной зоне. В случае MRF эффективная скорость сдвига определялась моделированием бингамовского течения с конфигурацией, схожей с приведенной на рис. 1, при использовании коммерческого программного пакета: вычислительная динамика жидкости (CFD) [26]. Для упрощения задачи и во избежание некоторых программных ограничений, модельный зазор формировался на цилиндрической поверхности, в отличие от сферической, используемой в MRF. Остальные параметры были аналогичны экспериментальным: реологические характеристики жидкости, радиус кривизны поверхности 75 мм, скорость перемещения стенки 3 м/с, величина зазора 2 мм, глубина погружения поверхности в жидкость 0,5 мм. Трехмерное решение было получено с использованием метода объема жидкости (VOF – volume of fluid) и гипотезы Перзюна для эффективной вязкости бингамовского пластика [27]:

$$\mu = \min \left\{ \begin{array}{l} A\mu_\infty \\ \mu_\infty + (\tau_0/\dot{\gamma}) \end{array} \right. \quad (3)$$

Здесь  $A$  – произвольный безразмерный множитель, задаваемый пользователем (обычно  $A = 10^3 - 10^5$ ),  $\mu_\infty$  – вязкость в пределе очень большой деформации (пластический предел),  $\tau_0$  – предел текучести (в рассматриваемом случае зависит от напряженности магнитного поля

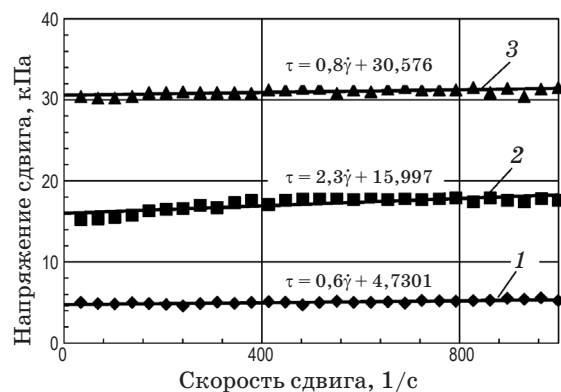
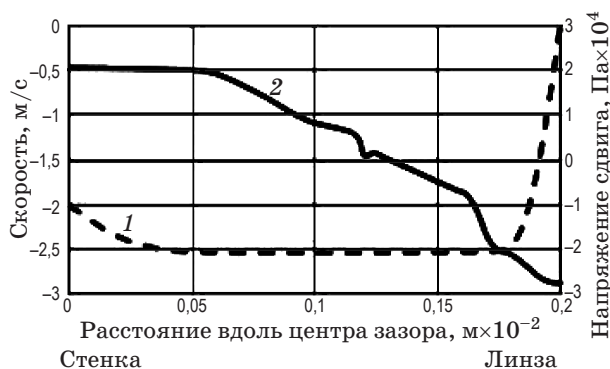


Рис. 8. Индуцируемые магнитным полем реологические характеристики МР полирующей жидкости. 1 – индукция поля  $B = 1$  кГс, 2 –  $B = 2$  кГс, 3 –  $B = 3$  кГс.

и концентрации магнитных частиц). Реологические характеристики, требуемые уравнением (3) и измеренные с помощью магнитореометра, приведены на рис. 8. Кроме того, были соответственно обоснованы граничные условия, временной интервал и размер ячейки, с тем чтобы точное и стабильное решение было достигнуто в разумных временных рамках. Погрешность оценивалась по величине давления в вершинной точке линзы, где оно должно равняться нулю в случае простой ньютоновской жидкости. В результате ошибка расчета составила менее 1%.

Как и предполагалось [8, 28, 29], моделирование выявило образование тонкого слоя деформируемой жидкости, текущей между поверхностью линзы и ядром недеформируемого материала, примыкающего к движущейся стенке. Этот факт иллюстрируется распределением касательных напряжений и профилем скорости поперек зазора, приведенных на рис. 9, для МР жидкости с пределом текучести 20 кПа. Очевидно, что сдвиговое напряжение меньше, чем предельное напряжение по всему ядру, и превышает предел текучести только в тонкой зоне около поверхности линзы. Профиль скорости характерно плоский в области ядра. Таким образом, в данном конкретном случае первоначальный интерфейс с большим зазором в 2 мм трансформируется в новый, эффективный, со значительно меньшим зазором (порядка 0,2 мм), приводя к соответствующему значительному росту эффективной скорости сдвига.



**Рис. 9.** Расчетные профили напряжения сдвига и скорости поперек зазора, образованного подвижной стенкой и поверхностью линзы. 1 – скорость, 2 – напряжение.

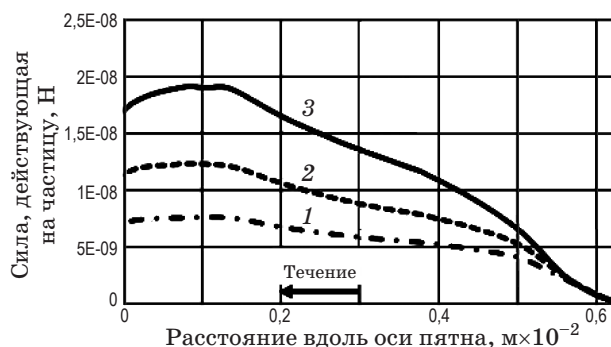


**Рис. 10.** Сопоставление профиля расчетной скорости уноса материала с экспериментальной и с экспериментальным распределением давления. 1 – экспериментальная функция уноса материала, 2 – расчетная сила, действующая на частицу, 3 – экспериментальное давление.

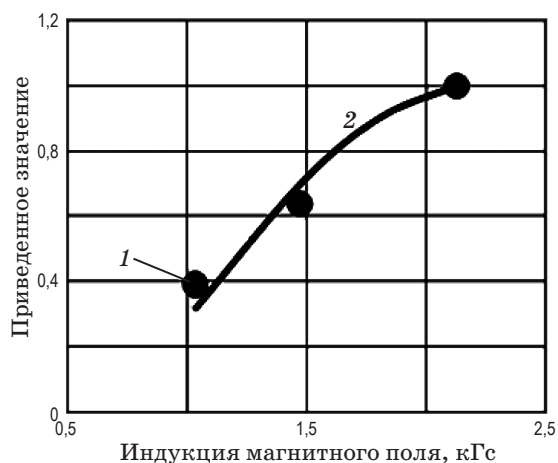
Профиль распределения силы, действующей на частицу, вдоль оси потока рассчитывался путем определения скорости сдвига в деформируемой зоне и подстановкой ее в уравнение (2). Затем нормированные значения силы наносились на график наряду с экспериментально полученными нормированными профилями скорости уноса материала. Экспериментальные функции уноса материала (распределение уноса в полирующем пятне) определялись на плоских деталях с колесом радиусом, равным радиусу линзы, используемой при моделировании. В качестве примера на рис. 10 показаны результаты сопоставления расчета и эксперимента для жидкости с пределом текучести 16 кПа. Наблюдаемое соответствие

экспериментального и расчетного профилей, по нашему мнению, свидетельствует в пользу гидродинамической (реализуемой при сдвиговом течении) моды уноса материала. Экспериментальный профиль распределения давления был получен с помощью сверхтонкого тактильного датчика давления “Tekscan”, нанесенного на поверхность линзы. Датчик состоял из множества отдельных чувствительных элементов в форме матрицы, позволяющих измерять распределение давления [30]. Как видно из рис. 10, профиль давления 3 сдвинут навстречу потоку и не коррелирует с распределением уноса материала, указывая на тот факт, что генерируемое пластическим течением гидродинамическое давление не приводит к уносу материала в контактной зоне.

Предлагаемая модель адекватно предсказывает такую известную в MRF закономерность, как рост скорости уноса материала при увеличении напряженности магнитного поля и концентрации магнитных частиц в результате соответствующего возрастания предела текучести жидкости. Изменение предела текучести приводит к изменению размера ядра и толщины пристенного деформируемого слоя с соответствующим изменением скорости сдвига, которая, в свою очередь, меняет силу, действующую на частицы. Это подтверждается графиком на рис. 11, где профили расчетной силы приведены для жидкостей с различным пределом текучести (5, 10 и 20 кПа). Как видно из графика, сила, действующая на частицу, возрастает с увеличением предела текучести жидкости. Факт роста силы с увеличением предела текучести согласуется с зависимостью скорости



**Рис. 11.** Зависимость силы, действующей на частицу (скорости уноса материала) от предела текучести МР жидкости. 1 –  $\tau_0 = 5$  кПа, 2 –  $\tau_0 = 10$  кПа, 3 –  $\tau_0 = 20$  кПа.

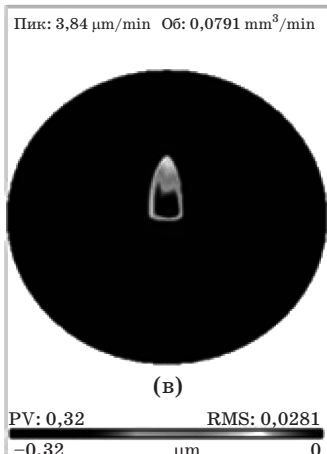
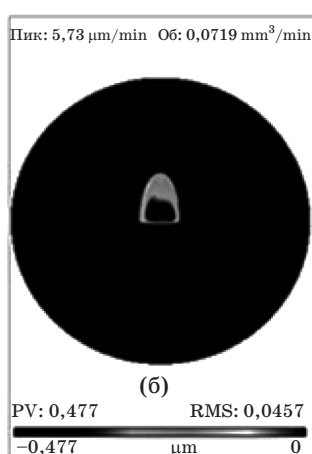


**Рис. 12.** Влияние магнитного поля на расчетную величину силы, действующей на частицу, и на экспериментальную скорость уноса материала. 1 – сила, 2 – скорость уноса.

уноса материала от напряженности магнитного поля, как показано на рис. 12. Здесь безразмерные величины максимума силы и скорости уноса материала построены в зависимости от напряженности магнитного поля. При этом значения предела текучести, используемые для

расчета силы и экспериментальной скорости уноса материала, определялись при одинаковой напряженности магнитного поля. Модель также выявила влияние геометрии сходящегося зазора на скорость уноса. Как следует из результатов расчета, приведенных на рис. 13а, сила, действующая на частицу, для зазора, образованного поверхностью с кривизной радиусом 50 мм, превышает силу, соответствующую зазору, сформированному поверхностью радиусом 75 мм. Этот прогноз был подтвержден экспериментально. Два пятна были выполнены на кварцевом стекле с использованием колеса радиусом 75 мм: одно – на выпуклой сфере радиусом 35 мм (рис. 13б), а другое – на плоской поверхности (рис. 13в). Максимальная скорость уноса материала в 5,73 мкм/мин была достигнута на сфере, в то время как при прочих равных условиях меньшее значение 3,84 мкм/мин было получено на плоскости.

Согласно уравнению (2), нагрузка на абразивную частицу очень чувствительна к размеру базисной частицы, поэтому следует ожидать роста скорости уноса материала с увеличением ее размера. Как показывают результаты экспериментов, подобное предсказание модели так-



**Рис. 13.** Влияние геометрии зазора на силу, действующую на частицу и скорость уноса материала. а – расчетные профили силы (скорости уноса) для линзы радиусом 75 мм – 1 и 50 мм – 2; б – интерферограмма полирующего пятна на выпуклой поверхности; в – интерферограмма полирующего пятна на плоской поверхности.

же оправдалось. На рис. 14а и 14б приведены MRF-пятна, полученные на кварцевом стекле с помощью двух жидкостей на основе магнитных частиц размером 1 и 4 мкм при различной напряженности магнитного поля, для того чтобы уравнивать предел текучести обеих жидкостей. При прочих равных условиях скорость уноса материала для жидкости с более крупными частицами (4,5 мкм/мин) превышает скорость (1,7 мкм/мин), полученную для жидкости с малыми частицами. Напряженности магнитного поля, требуемые для уравнивания предела текучести двух жидкостей, были определены с помощью магнитореологических измерений, проведенных на магнитореометре при малых скоростях сдвига, как показано на рис. 14в.

Далее приводятся некоторые количественные оценки с использованием теории Герца о проникновении в поверхность [31], которая в общих чертах является общепринятым подходом при моделировании уноса материала

в случае стекла [32]. Для сферического индентера напряжения растяжения (tensile stress), генерируемые на поверхности контакта, вычисляются следующим образом:

$$\sigma_p = G_p(1 - 2\nu_m)/2\pi r_c^2. \quad (4)$$

Здесь  $r_c$  – радиус контакта,  $G_p$  – нагрузка на частицу (контактная сила). Радиус контакта определяется как

$$r_c = [(3/4)G_p r_a k_E]^{1/3}, \quad (5)$$

$$k_E = [(1 - \nu_m^2)/E_m] + [(1 - \nu_a^2)/E_a], \quad (6)$$

где  $r_a$  – радиус абразивной частицы (индентер),  $\nu_m$  и  $E_m$  – коэффициент Пуассона и модуль Юнга материала (стекла),  $\nu_a$  и  $E_a$  – коэффициент Пуассона и модуль Юнга абразивной частицы.

Теория Герца также предсказывает глубину проникновения индентера в виде [29]

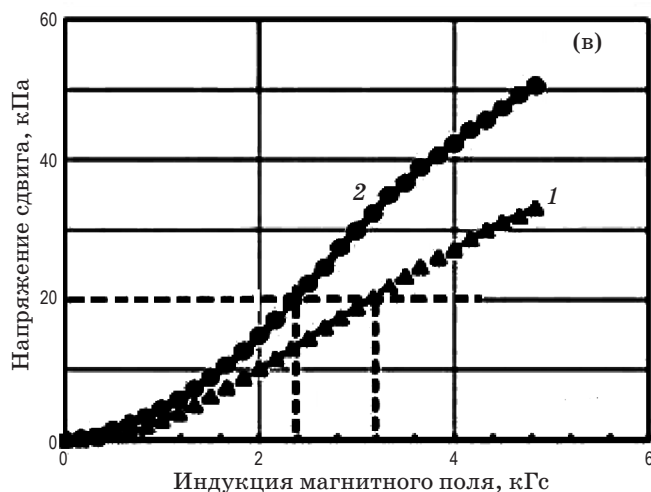
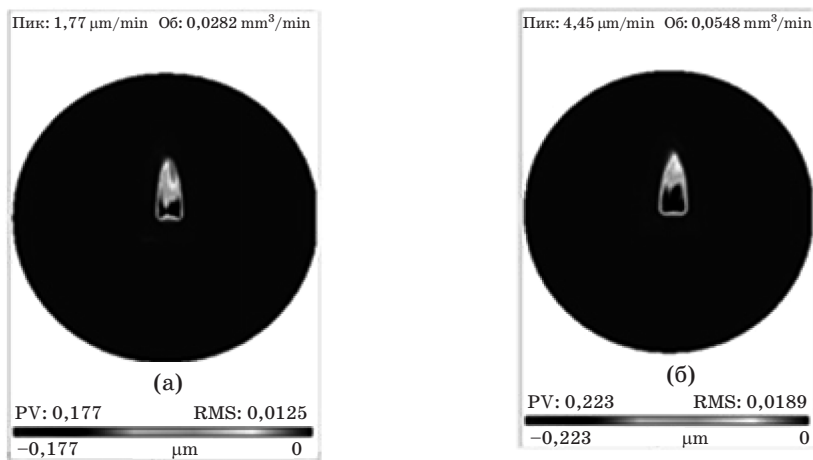


Рис. 14. Влияние размера частиц на скорость уноса материала. а – интерферограмма полирующего пятна, полученного с использованием МР жидкости на основе частиц размером 1 мкм; б – интерферограмма полирующего пятна, полученного с использованием МР жидкости на основе частиц размером 4 мкм; в – реологические измерения для определения величин магнитного поля, уравнивающих предел текучести жидкостей на основе частиц размером 1 мкм (1) и 4 мкм (2).

$$h_t = (9/16)^{1/3} (G_p/E_r)^{2/3} (1/r_a)^{1/3}, \quad (7)$$

где  $E_r = 1/k_E$  – приведенный модуль упругости.

Для того чтобы оценить величину нагрузки на частицу и соответствующие контактные напряжения, генерируемые абразивной частицей, в дополнение к сдвиговым напряжениям, развиваемым в жидкости, необходимо иметь представление о реальных размерах базисных частиц, которые, вероятнее всего, имеют вид агрегатов, состоящих из оригинальных единичных магнитных частиц. Размер такого структурного элемента зависит от соотношения разрушающих (гидродинамических) и восстанавливающих (магнитных) сил, действующих на агрегат. Это отношение определяется числом Мейсона (Mason number) [33]

$$M = (\mu_0 \kappa_a H^2) / \eta_0 \dot{\gamma}, \quad (8)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\kappa_a$  – магнитная восприимчивость агрегата,  $H$  – напряженность магнитного поля,  $\eta_0$  – динамическая вязкость жидкости.

Как было показано в [33], размер агрегата, в частности соотношение длины к поперечному размеру (или длина цепочки частиц), уменьшается с уменьшением числа Мейсона. При относительно высоких скоростях сдвига ( $10^4 \text{ с}^{-1}$ ),  $H = 150 \text{ кА/м}$  и  $\kappa_a = 5$ , соответствующих рассматриваемому случаю, значение  $M = 14$  предсказывает значение отношения длины к поперечному размеру порядка 1–2, что означает малый размер агрегата. Для оценки поверхностных растягивающих напряжений и глубины пенетрации было принято допущение, что агрегат состоит из четырех сферических частиц диаметром 4 мкм. Подобный агрегат может считаться эллипсоидом с соотношением продольной и поперечной осей 1,5. Вычисления растягивающих напряжений по уравнениям (2) и (3) были выполнены для случая абразивных частиц окиси церия размером 100 нм и кварцевого стекла, а коэффициент  $K$  в уравнении (2) выбран равным 1 [23, 24]. Соответствующие результаты приведены на рис. 15 (штриховая линия 3). Следует отметить, что рассчитанная величина растягивающих напряжений порядка сотен мегапаскалей сопоставима с пределом прочности стекла (33 МПа) и даже некоторых более твердых материалов. Принимая во внимание, что предел прочности материала при растяжении – это состояние предельного напряжения, за которым следует разрушение материала в виде пластического

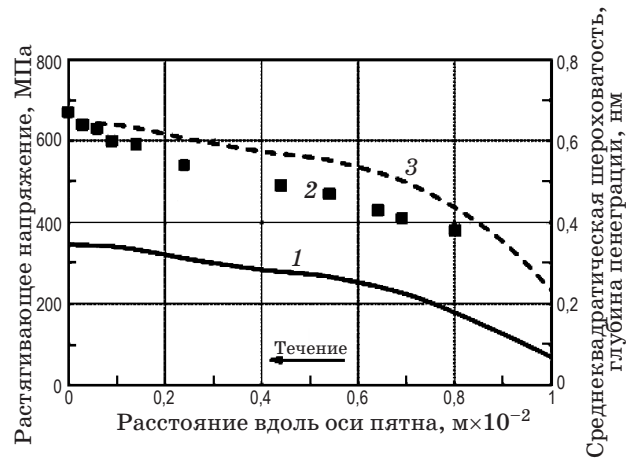


Рис. 15. Результаты расчетов индентации абразивных частиц в поверхность. 1 – глубина пенетрации, 2 – шероховатость, 3 – напряжение.

или хрупкого разрушения, предсказываемые напряжения достаточны для обеспечения наблюдаемого на практике уноса материала. Это служит некоторым количественным подтверждением справедливости обсуждаемой модели.

Иным подходом к проверке адекватности модели может служить сравнение величины измеренной шероховатости поверхности с глубиной пенетрации, рассчитанной с использованием выражения (7). Такое сравнение показано на рис. 15, где реальное измеренное распределение шероховатости вдоль оси полирующего пятна, полученного на кварцевом стекле (черные квадраты 2), находится в хорошем качественном и приемлемом количественном соответствии с рассчитанной глубиной пенетрации (сплошная линия 1). В общем случае глубина пенетрации в несколько ангстрем близка к реальным экспериментальным результатам для шероховатости поверхности, наблюдаемой при МР полировке стекол [34].

#### 4. Заключение

Метод магнитореологического полирования в сочетании с возможностями, предоставляемыми современными станками с ЧПУ, является детерминистским высокоточным процессом для обработки оптических поверхностей. В работе это иллюстрируется на примере изготовления оптики с непрерывно меняющимся фазовым профилем для управления волновым фронтом мощных лазеров, а также для финиш-

ной доводки асферической оптики. Анализируются возможные механизмы уноса материала при MRF. Измерения и анализ механических свойств намагниченной МР жидкости показывают, что аналог традиционной полировальной подложки, сформированный из такого материала, не в состоянии поддерживать нагрузку на абразивную частицу, достаточную для обеспечения скорости уноса материала, характерной для MRF.

Предлагается и анализируется концепция уноса материала в процессе полирования с использованием МР жидкости, при которой нагрузка, необходимая для наноиндентирования абразивных частиц в поверхность, обеспечивается за счет их взаимодействия вблизи по-

верхности с более крупными и массивными базисными магнитными частицами, пульсирующими вследствие столкновений в сдвиговом потоке концентрированной бинарной суспензии. Особенности сдвигового течения гранулярной среды и численное моделирование использованы при моделировании процесса. Модель находится в хорошем качественном и приемлемом количественном соответствии с экспериментальными результатами, полученными с использованием MRF.

Авторы выражают благодарность коллегам из QED Technologies International Justin Trasy, Paul Dumas, Bob James и Arpad Sekeres за помощь в проведении экспериментов и плодотворные обсуждения.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Marinescu I., Uhlmann E., T. Doi.* Handbook of Lapping and Polishing // CRC Press. 2006. 492 p.
2. *Walker D.D., Beaucamp A.T.H., Brooks D., Freeman R., King A., McCavana G., Morton R., Riley D., Simms J.* Novel CNC polishing process for control of form and texture on aspheric surfaces // Proc. SPIE. 2001. V. 451. P. 267–276.
3. *Momber A., Kovacevic R.* Principles of Abrasive Water Jet Machining. New-York: Springer, 1998. 394 p.
4. *Booij S. M.* Fluid jet polishing. Doctoral thesis, Technische Universiteit Delft, 2003. 168 p.
5. *Mori Y., Yamauchi K., Endo K.* Mechanism of atomic removal in elastic emission machining // J. Jpn. Soc. Prec. Eng. 1997. V. 10. P. 24–28.
6. *Kordonsky W., Prokhorov I., Gorodkin S., Gorodkin G., Gleb L., Kashevsky B.* Magnetorheological polishing devices and methods // U.S. patent № 5449313. 1993.
7. *Kordonski W., Golini D., Hogan S.* System for abrasive jet shaping and polishing of a surface using magnetorheological fluid // U.S. patent № 5971835. 1999.
8. *Kordonski W., Jacobs S.* Magnetorheological finishing // Int. J. Mod. Phys. 1996. V. B-10. P. 2837–2848.
9. *Kordonski W., Shorey A., Tricard M.* Magnetorheological jet finishing technology // J. Fluid Eng. 2006. V. 128. P. 20–26.
10. *Lambropoulos J., Miao C., Jacobs S.* Magnetic field effects on shear and normal stresses in magnetorheological finishing // Opt. Express. 2010. V. 18. P. 19713–19723.
11. *Shorey A., Jacobs S., Kordonski W., Gans R.* Experiments and observations regarding the mechanisms of glass removal in magnetorheological finishing // Appl. Opt. 2001. V. 40. P. 20–33.
12. *DeGrootte J., Marino A., Wilson J., Bishop A., Lambropoulos J., Jacobs S.* Removal rate model for magnetorheological finishing (MRF) of glass // Appl. Opt. 2007. V. 46. P. 7927–7941.
13. *Miao C., Shafrir S., Lambropoulos J., Jacobs S.* Normal force in magnetorheological finishing // Proc. SPIE. 2009. V. 7426. P. 74260C.
14. *Miao C., Shafrir S., Lambropoulos J., Mici J., Jacobs S.* Shear stress in magnetorheological finishing for glasses // Appl. Opt. 2009. V. 48. P. 2585–2594.
15. *Dai Y., Song C., Peng X., Shi F.* Calibration and prediction of removal function in magnetorheological finishing // Appl. Opt. 2010. V. 49. P. 298–306.
16. *Kordonski W., Gorodkin S.* Material removal in magnetorheological finishing of optics // Appl. Opt. 2011. V. 50. P. 1984–1994.

17. *Kordonski W.* Elements and devices based on magnetorheological effect // *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 1993. V. 4. P. 65–69.
18. *Menapace J., Dixit S., Genin F., Brocious W.* Magnetorheological finishing for imprinting continuous phase plate structure onto optical surfaces // *Proc. of the XXXV Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers, Colorado.* 2003. V. 5273. P. 220–230.
19. *Preston F. W.* The theory and design of plate glass polishing machines // *J. Soc. Glass Technol.* 1927. V. 11. P. 214–256.
20. *Kordonski W., Gorodkin S.* Magnetorheological measurements with consideration for the internal magnetic field in samples // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2009. V. 149. P. 012064.
21. *Basim G., Vakarelski I., M. Moudgil B.* Role of interaction forces in controlling the stability and polishing performance of CMP slurries // *J. Colloid Interface Sci.* 2003. V. 263. P. 506–515.
22. *Laun H., Gabriel C., Schmidt G.* Primary and secondary normal stress differences of a magnetorheological fluid (MRF) up to magnetic flux densities of 1T // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 2008. V. 148. P. 47–56.
23. *Shen H. H.* Granular shear flows-constitutive relations and internal structures // 15th ASCE Engineering Mechanical Conference (Columbia University). 2002. P. 1–7.
24. *Karion A., Hunt M.* Wall stress in granular Couette flow of mono-sized particles and binary mixtures // *Powder Technol.* 2000. V. 109. P. 145–163.
25. *Losert W., Bocquet L., Lubensky T., Gollub J.* Particle dynamics in sheared granular matter // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 85. P. 1428–1431.
26. Storm/CFD2000, [www.adaptive-research.com](http://www.adaptive-research.com).
27. *Perzyna P.* Fundamental problems in viscoplasticity // *Adv. Appl. Mech.* 1966. V. 9. P. 243–377.
28. *Tichy J. A.* Hydrodynamic lubrication theory for the Bingham plastic flow model // *J. Rheol.* 1991. V. 35. P. 477–96.
29. *Gertzos K., Nikolakopoulos P., Papadopoulos C.* CFD analysis of journal bearing hydrodynamic lubrication by Bingham lubricant // *Tribol. Int.* 2008. V. 41. P. 1190–1204.
30. <http://www.tekscan.com/>.
31. *Ang S., Scholz T., Klocke A., Schneider G.* Determination of elastic/plastic transition of human enamel by nanoindentation // *Dent. Mater.* 2009. V. 15. P. 1403–1410.
32. *Cook L. M.* Chemical processes in glass polishing // *J. Non-Cryst. Solids.* 1990. V. 120. P. 152–171.
33. *Shulman Z., Kordonski V., Zaltsgendler E., Prokhorov I., Khusid B., Demchuk S.* Structure, physical properties, and dynamics of magnetorheological suspensions // *Int. J. Multiphase Flow.* 1986. № 12. P. 935–955.
34. *Shorey A., Gorodkin S., Kordonski W.* Effect of process parameters on surface morphology in MRF // *Technical Digest SPIE.* 2003. V. TD02. P. 69–71.