

УДК 621.891:681.7:539.621

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ГЕЛЬНЫХ КВАРЦЕВЫХ СТЕКОЛ

Д. В. ТКАЧУК^{а+}, А. В. СЕМЧЕНКО^б, Ю. В. НИКИТЮК^б

Разработана методика регистрации температурных полей при моделировании абразивной обработки поверхностей оптических деталей из гельных кварцевых стекол. В статье описаны принцип действия и конструкция экспериментальной установки, реализующей метод оптико-электронного сканирования. Приведены результаты измерения температуры в поверхностном слое детали и в зоне контакта модельной пары инструмент — деталь.

Ключевые слова: абразивная обработка, гельное стекло, температурное поле, распределение температуры.

Введение. Оптические элементы являются неотъемлемым компонентом современных авиационно-космических, медицинских приборов, изделий лазерной, бытовой техники, устройств специального назначения. Материалами для таких элементов служат оптические стекла различных марок, ситаллы, оптические керамики, кристаллический кварц, полупроводниковые кристаллы (германий, кремний) и др. [1]. В их числе и кварцевые стекла, получаемые по золь-гель технологии [2, 3].

В настоящее время известны несколько вариантов золь-гель способа получения кварцевых стекол [4]. С технологической точки зрения наиболее приемлемым является коллоидный вариант, позволяющий в несколько раз, по сравнению с гибридным вариантом, сократить длительность цикла производства стекла [5] и синтезировать кварцевые гельные стекла, пригодные для применения в оптоэлектронике, лазерной технике, в качестве экранов в устройствах специального назначения. Коллоидным золь-гель способом могут быть получены изделия диаметром 5÷15 см и толщиной 0,1÷2,0 мм. Особенности технологии приводят к тому, что одна из поверхностей изделия имеет значительную шероховатость и по этой причине должна быть обработана. Однако соотношение между линейными размерами заготовок таково, что при абразивной обработке возможно раскалывание стекол за счет интенсивного механического и теплового воздействий. Поэтому моделирование процессов обработки гельных кварцевых стекол с учетом тепловых явлений в зоне контакта является важной практической задачей.

Производство оптических деталей включает различные операции абразивной обработки, например, шлифование и прецизионные технологии притирки и доводки [6]. В таких операциях работоспособность алмазного инструмента, а также состояние поверхностного слоя и точность обработки деталей существенно зависят от тепловых явлений в зоне контакта обрабатываемого изделия с инструментом [7]. Определение температур, возникающих при шлифовании, необходимо для установления таких режимов обработки, при которых они не превышают пределов, безопасных для алмазных зерен, и не влияют на качество обработанной поверхности.

В работах [8, 9] установлена взаимосвязь теплофизических процессов при притирке с точностью и производительностью формообразования при обработке сферических оптических поверх-

а Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Б. Беларусь, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32а.

б Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины. Беларусь, 246699, г. Гомель, ул. Советская, 104.

+ Автор, с которым следует вести переписку.

ностей. Получено распределение температуры на обрабатываемой поверхности и показано, что средняя температура поверхности детали повышается на $15 \div 20$ °С. Однако используемый для измерения температуры метод основан на применении термопар, монтаж которых требует нарушения целостности заготовки. Другим его недостатком является возможность измерения только средней поверхностной температуры, в то время как основная доля выделяющейся теплоты концентрируется в поверхностных слоях, непосредственно прилегающих к пятнам касания, и именно она определяет характер и интенсивность разрушения материала детали. Поэтому для практики обработки оптических поверхностей значительный интерес представляет задача определения температуры на локальных участках контакта инструмента и детали и распределения температуры по толщине их поверхностных слоев.

При абразивной обработке оптических деталей из стекол имеют место следующие основные механизмы разрушения поверхностного слоя детали: микрорезание и усталостное разрушение [10], т. е. реализуется один из видов изнашивания, классифицируемый в трибологии как изнашивание закрепленным абразивом [11, 12]. Таким образом, подобие процессов, протекающих в зоне контакта при абразивной обработке и трении, позволяет изучать их на основе общей методологии. В этой связи для решения данных задач может быть использовано оптико-электронное сканирование поверхностей, положенное в основу методики регистрации температурных полей в контакте трущихся тел [13, 14].

Цель работы — создание методики определения локальных температур в модельном контакте оптическая деталь — инструмент и распределения температуры по толщине поверхностного слоя детали.

Объекты исследования и геометрия контакта. Реализация температурных измерений в реальных условиях обработки оптических поверхностей представляет собой сложную инженерную задачу, решение которой предполагает на первом этапе проведение лабораторных экспериментов. В этой связи в данной работе выполнено моделирование процесса обработки, для чего абразивный инструмент заменялся металлическим диском и была принята наиболее простая геометрия контакта: плоскость—плоскость.

В качестве объектов исследования были выбраны кварцевые стекла, полученные по золь-гель технологии [3]. Из них изготавливался неподвижный элемент контактной пары. Движущийся элемент—контртело, моделирующий обрабатывающий инструмент, выполнялся из стали, титана и алюминиевого сплава. Как отмечено выше, воздействие абразивных зерен на обрабатываемую поверхность стекла вызывает те же механические процессы на микроуровне, что и контакт неровностей металлической поверхности с поверхностью стекла, твердости которых значительно различаются. Кроме того, в практике абразивной обработки применяются шлифовальные круги с алмазными зёрнами, имеющими металлическое покрытие, служащее для улучшения удержания зёрен в связке и более равномерного распределения тепловых потоков между обрабатываемой деталью, алмазами и связкой [15]. Это позволяет в первом приближении использовать указанные выше модельные пары.

Механические и теплофизические характеристики материалов приведены в таблице.

Механические и теплофизические свойства материалов

Материал	Твердость, МПа	Модуль упругости, 10^5 МПа	Температура плавления, К	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Сталь	1300	2,00	1807	73
Титан	1900	1,30	1943	30
Алюминиевый сплав	270	0,62	933	217
Кварцевое стекло	83	0,70	1923—1973	0,69

Для изучения распределения температуры по толщине поверхностного слоя образца из стекла применялась схема колодка (в виде кольцевого сектора) — плоская поверхность диска (рис. 1, а). Колодка выполнялась из стекла толщиной 5 мм, а диски диаметром 180 и толщиной 7 мм изготавливались из металлов. При определении локальных температур использовалась аналогичная геометрия контакта, но с другим расположением системы регистрации температурного поля (рис. 1, б).

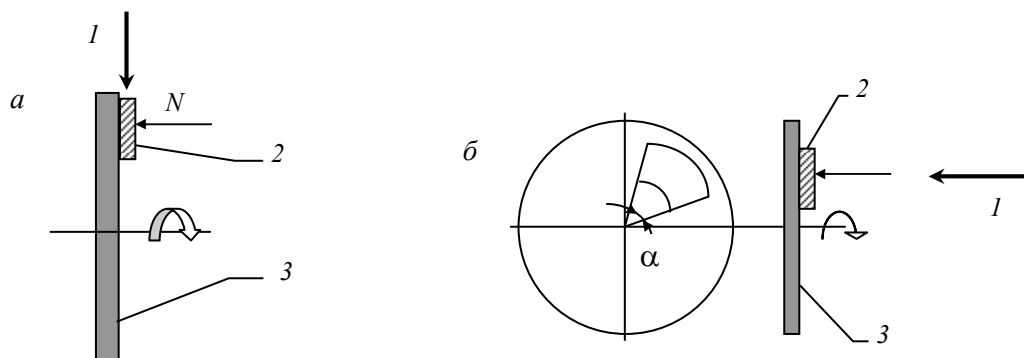


Рис. 1. Схема контакта образцов при регистрации распределения температуры по глубине образца из стекла (а) и локальных температур на поверхности его контакта с инструментом (б): 1 — оптическая ось регистрирующей системы; 2 — колодка (стекло); 3 — диск (металл)

Были выбраны следующие режимы нагружения: скорость скольжения изменялась в диапазоне 1÷80 м/с, номинальное давление составляло 0,1÷1,0 МПа.

Экспериментальная установка. Установка, предназначенная для изучения температурных полей в зоне контакта инструмента и детали, реализует метод оптико-электронного сканирования и состоит из высокоскоростной машины трения и системы регистрации температурного поля. Машина трения обеспечивает плавное изменение скорости скольжения в диапазоне 1÷100 м/с (контроль скорости осуществляется с помощью электронного частотомера) и регистрацию коэффициента трения с помощью тензодатчиков, подключенных к полумостовой схеме усилителя ТА-5, сигнал с которого подается на вход светолучевого осциллографа.

Система регистрации температурного поля (рис. 2) включает оптико-электронный преобразователь (ОЭП), видеоконтрольное устройство (ВКУ), видеомагнитофон (ВМ), усилитель с полосой пропускания 0÷1,2 МГц (У), устройство формирования осциллограмм яркости телевизионного изображения (УФО), цифровой запоминающий осциллограф С9-8 (ЦО).

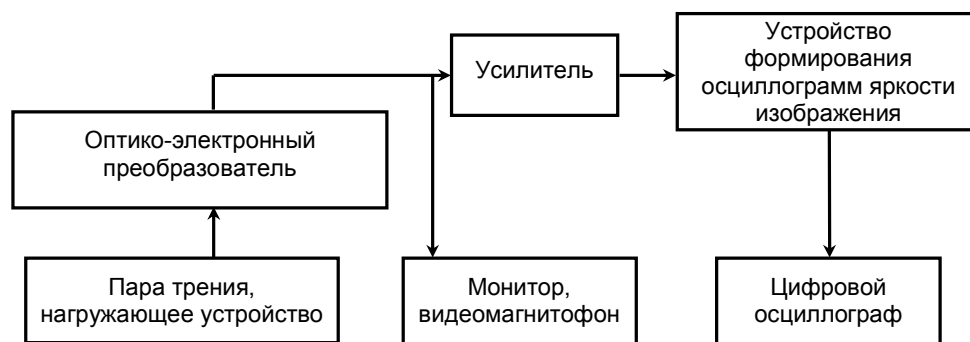


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки для регистрации температурных полей при моделировании обработки оптических поверхностей

Оптико-электронный преобразователь состоит из револьверной головки, закрепленного на ней с возможностью фокусировки в вертикальном направлении сменного объектива оптического микроскопа с увеличением от $\times 4$ до $\times 25$ и промышленной телевизионной камеры КТП-62, оптическая ось объектива которой совмещена с оптической осью объектива микроскопа. Преобразователь закреплен на машине трения с помощью специальной стойки, обеспечивающей его перемещение в вертикальном и горизонтальном направлениях, а также разворот на 90° , что соответствует горизонтальному положению оптической оси преобразователя.

ВКУ представляет собой подсоединенный к ОЭП при помощи усилительно-коммутирующего блока телевизионный монитор с низкочастотным воспроизводимым сигналом.

Тепловое излучение, возникающее в зоне трения, проходит через объектив микроскопа, и с помощью телекамеры генерируется электрический сигнал, который преобразуется в высокочас-

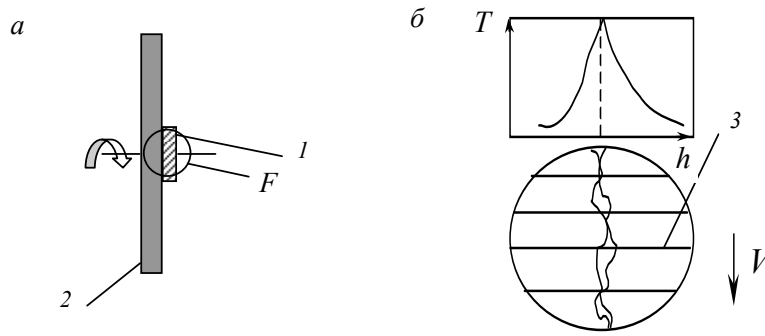


Рис. 3. Схема контакта образцов (а) — вид сверху рисунка 1а (оптическая ось ОЭП направлена за плоскость рисунка) и увеличенное изображение зоны контакта F на экране ВКУ (б): 1 — колодка; 2 — диск; 3 — линия маркера

тотный сигнал и подается на вход ВКУ, обеспечивая телеизображение участка зоны контакта. С помощью ВМ осуществляется запись изображения. УФО при подключении к выходу ВМ позволяет отображать в милливольтках на экране ЦО распределение яркости телеизображения по двум сечениям (например, вдоль направления скольжения и в перпендикулярном ему направлении).

При трении по схеме, представленной на рис. 1, а, возможно измерение температуры под поверхностью трения как неподвижного, так и движущегося образца. Измерение осуществляется вдоль линии маркера, которая располагается на экране ВКУ перпендикулярно направлению скольжения и может перемещаться вдоль него по изображению исследуемого участка зоны контакта (рис. 3). В действительности профили сопрягаемых поверхностей не наблюдаются, т.к. разрешение измерительной системы по линейным размерам составляет 5 мкм, что на один — два порядка превышает среднее арифметическое отклонение профиля. Поэтому невозможно определить, установлен ли маркер по центру пятна контакта или между пятнами. В сечении дорожки трения, выбранном с помощью маркера, может оказаться несколько пятен, поэтому регистрируется температура, усредненная по этим пятнам.

Тарировка исследовательского комплекса (переход от показаний осциллографа в милливольтках к температуре) проводилась с применением оптического пирометра, реализующего метод исчезающей нити. Пирометр использовался в качестве стандартного источника излучения и устанавливался в поле зрения ОЭП взамен пары трения. Яркостная температура источника переводилась в истинную с учетом отражательной способности исследуемых материалов. Средняя погрешность измерения температуры составляла $\approx \pm 2\%$.

Результаты исследований и их обсуждение. Распределение температуры по глубине поверхностного слоя детали из стекла и положение максимума кривой распределения определяются свойствами сопрягаемых материалов и режимами их нагружения. Так, при контакте неподвижного образца из кварцевого стекла с вращающимся образцом из титана зависимости температуры под поверхностью стекла от глубины отображаются монотонно убывающими кривыми (рис. 4, кривая 1). Подобное распределение температуры свидетельствует о выделении теплоты в очень тонком (толщиной несколько микрометров) поверхностном слое кварцевого стекла.

Для пары кварцевое стекло — алюминиевый сплав во всем исследованном диапазоне нагрузок и скоростей скольжения характерны зависимости $T(h)$ без максимумов под поверхностью стекла. При $v \leq 45$ м/с распределение температуры по глубине можно условно разделить на два участка (рис. 4, кривая 2), градиенты темпе-

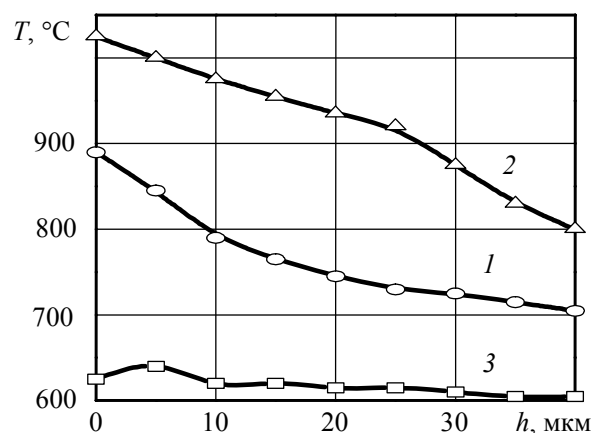


Рис. 4. Распределение температуры по глубине неподвижного образца из кварцевого стекла в контакте с титаном (1, $v = 18$ м/с), алюминиевым сплавом (2, $v = 22$ м/с) и сталью (3, $v = 20$ м/с); $p_a = 0,1$ МПа

ратуры на которых могут различаться в несколько раз. По положению условной границы между более пологим и более крутым участками кривой можно приблизительно оценить толщину интенсивно нагреваемого и деформируемого поверхностного слоя. При $v > 45$ м/с пологий участок не регистрируется, по-видимому, из-за того, что пластическая деформация и тепловыделение локализуются в очень тонких поверхностных слоях стекла.

Распределение температуры по глубине с максимумом под поверхностью контакта характерно для пары кварцевое стекло — сталь. Так, в определенном диапазоне нагрузочно-скоростных параметров наблюдается незначительный максимум температуры под поверхностью стекла, на глубине порядка 5 мкм (рис. 4, кривая 3). При $v \leq 20$ м/с коэффициент трения f для этой пары не превышает 0,25. Согласно теоретическим исследованиям М. М. Саверина [16], при таком значении f и среднем диаметре пятна контакта, равном 25÷30 мкм для выбранных режимов нагружения, точка, в которой касательные напряжения максимальны, лежит под поверхностью контакта, на глубине 10÷12 мкм. Следовательно, можно предположить, что наибольшее тепловыделение происходит под поверхностью стекла, в зоне максимальных касательных напряжений.

Использование геометрии контакта, приведенной на рис. 1, б, позволило визуализировать локальные источники теплового излучения (нагретые пятна контакта) на экране ВКУ и определять температуру любой точки единичного пятна. Установлено, что существует диапазон температур, в который попадает наибольшее число пятен контакта, зарегистрированных в пределах контактной площадки. Каждому нагрузочно-скоростному режиму соответствует свой диапазон. С ростом номинального давления и скорости скольжения он смещается в область более высоких температур. При экстремальных режимах нагружения максимальная температура локальных тепловых источников может приближаться к температуре плавления гелевого кварцевого стекла.

Выводы. Метод оптико-электронного сканирования поверхностей трения применен для изучения тепловых процессов при моделировании обработки оптических поверхностей. На его основе модернизирована экспериментальная установка и разработана методика регистрации распределения температуры по толщине тонких поверхностных слоев обрабатываемой детали и локальных температур в контакте детали с инструментом. Показано, что характер распределения температуры по глубине и положение максимума кривой распределения зависят от свойств сопрягаемых материалов и режимов нагружения, а локальные температуры на границе раздела могут достигать значений, близких к температуре плавления гелевого кварцевого стекла.

Авторы выражают признательность Белорусскому республиканскому фонду фундаментальных исследований за финансовую поддержку данной работы в рамках проектов Ф03М-070 и Т04М-205.

Обозначения

T — температура; h — глубина под поверхностью образца из стекла; v — скорость скольжения; N — нормальная нагрузка; p_a — номинальное давление.

Литература

1. Лебедева В. В. Техника оптической спектроскопии. — М.: Изд-во Московского ун-та. — 1986
2. Brinker C. J., Sherer G. W. Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing. — New York: Academic Press. — 1990
3. Малашкевич Г. Е., Подденежный Е. Н., Мельниченко И. М., Семченко А. В. Спектрально-люминесцентные свойства Sm- и Ce-Sm-содержащих кварцевых гель-стекол // ФТТ. — 1998 (40), № 3, 458—465
4. Петровский Г. Т., Пашкин В. С., Яхкинд А. К. Основные направления золь-гель синтеза стеклообразных материалов для оптики из коллоидных форм кремнезема // Физика и химия стекла. — 1997 (23), 43—54
5. Способ получения легированного кварцевого стекла: патент № 1861 РБ, МПК С 03В 8/02. Офиц. бюл. — 1997, № 4 / А. А. Бойко, Е. Н. Подденежный, И. М. Мельниченко
6. Сулим А. В. Производство оптических деталей. — М.: Высшая школа. — 1969

7. **Рогов В. В., Филатов Ю. Д., Карапузов В. Р. и др.** Температура на зерне алмазного круга в процессе шлифования // Синтетические алмазы. — 1978, № 3, 49—53
8. **Маляренко А. Д., Филонов И. П.** Технологические основы управляемого формообразования оптических поверхностей. — Минск: ВУЗ-ЮНИТИ БГПА. — 1999
9. **Маляренко А. Д.** Влияние температуры полировальной суспензии на точность и производительность обработки оптических деталей // Сверхтвердые материалы. — 1999, № 3, 70—72
10. **Синтетические алмазы в обработке металлов и стекла** / Под ред. Н. А. Розно. — М.: Машиностроение. — 1968
11. **Богданович П. Н., Прушак В. Я.** Трение и износ в машинах. — Минск: Выш. шк. — 1999
12. **Мышкин Н. К., Петроковец М. И.** Трибология. Принципы и приложения. — Гомель: ИММС НАНБ. — 2002
13. **Tkachuk D. V., Bogdanovich P. N., Belov V. M.** Method of determining temperature fields in rubbing solid contacts // Tribotest Journal. — 2004 (11), N 2, 125—135
14. **Tkachuk D. V., Bogdanovich P. N.** Thermal processes at high-speed friction // International Journal of Applied Mechanics and Engineering. — 2004 (9), 177—182
15. **Куц В. И., Шило А. Е., Чальый В. Т.** Математическая модель теплопереноса в системе алмазное зерно — покрытие — полимерная связка // Сверхтвердые материалы. — 2003, № 5, 49—59
16. **Саверин М. М.** Контактная прочность материала в условиях одновременного действия нормальной и касательной нагрузок. — М.: Машгиз. — 1946

Поступила в редакцию 14.03.05.

Tkachuk D.V., Semchenko A.V., and Nikituk Yu. V. A Method of temperature measurement when modeling surface processing of gel-quartz-glass optics.

A method of registering temperature fields when modeling abrasive surface processing of gel-quartz-glass optics is developed. The paper describes the principle of action and the design of an experimental installation employing the technique of optical electron scanning. The results of temperature measurements in the surface layer of a workpiece and in the contact zone in the model tool-workpiece pair are shown.