

Исследование влияния особенностей процесса полирования на качество обработки поверхностей оптических деталей

В. Е. Фролова, Д. Г. Денисов, В. Е. Патрикеев, Н. А. Ерофеева

Проведен анализ практических результатов современного мирового состояния технологии формообразования с целью обеспечения эффективности отечественных технологий. Выполнен сравнительный анализ существующих математических моделей, описывающих функцию съема оптического материала. Осуществлена апробация реальной математической модели, разработанной на основе экспериментальных исследований, в производственных условиях. Результатом работы является анализ графической зависимости шероховатости отполированной поверхности от концентрации полировальной суспензии.

Ключевые слова: формообразование оптических поверхностей, функция съема оптического материала, концентрация полировальной суспензии, шероховатость поверхности.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-3-85-91

Введение

Для современных технологий формообразования поверхностей оптических деталей наблюдается нерешенная научная задача, которая связана с разработкой единой математической модели процесса полирования, зависящего от большого числа факторов: технологических, физико-химических, механических, а также факторов, обусловленных квалификацией технолога-оптика. Решение данной проблемы представляет интерес с точки зрения разработки высокоточных изделий: деталей для астрономической и космической оптики, зеркал гироскопов, деталей из бесцветного

стекла, участвующих в формировании изображения оптической системы. На данный момент химико-механический процесс формообразования поверхностей (CMP – chemical mechanical polishing) с указанными технологическими требованиями осуществляется на станках рычажного типа или оптических станках с полноразмерным инструментом на смоляной основе. Исследование влияния всех особенностей при полировании на данном оборудовании может позволить создать единую математическую модель процесса формообразования, которая увеличит эффективность данного процесса, повысит срок эксплуатации оптических деталей, а также уменьшит трудозатраты.

Фролова Валерия Евгеньевна¹, студент.

E-mail: v.e.frolova@mail.ru

Денисов Дмитрий Геннадьевич¹, доцент, к.т.н.

E-mail: denisov_dg@mail.ru

Патрикеев Владимир Евгеньевич², зам. нач. НПК.

Ерофеева Наталья Александровна², инженер-технолог.

¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1.

² АО «ЛЗОС».

Россия, 140080, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1.

Статья поступила в редакцию 31 мая 2022 г.

Структура многофакторной математической модели ХМП

Химико-механический процесс формообразования оптических поверхностей можно представить в виде многофакторной математической модели (рис. 1), позволяющей обеспечить оптимальную шероховатость профиля оптической поверхности [1].

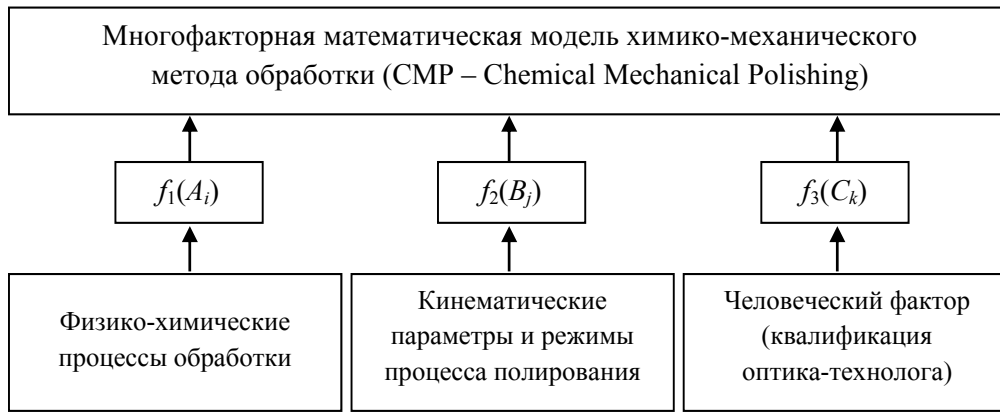


Рис. 1. Структура многофакторной математической модели ХМП

В данной структуре $f_1(A_i)$, $f_2(B_j)$, $f_3(C_k)$ – функциональные зависимости параметров A_i , B_j , C_k , соответственно.

Совокупность параметров A_i учитывает физико-химические процессы, возникающие между притирающимися поверхностями полировального инструмента и обрабатываемой детали в присутствии полировальной суспензии. B_j – совокупность кинематических параметров станочного оборудования, которая определяется особенностями его настройки.

Человеческий фактор C_k , зависящий от мастерства и квалификации технолога-оптика, представляет наибольший инженерный интерес. Влияние данного фактора ограничивает возможность управления процессом формообразования оптических поверхностей. Минимизация фактора C_k позволит получать оптимальные параметры формы и качества профиля оптической поверхности, добившись максимальной автоматизации процесса.

С учетом выше рассмотренного идеализированная математическая модель управления технологическим процессом формообразования оптических поверхностей может быть представлена в виде:

$$q = K \cdot \bar{F} \cdot \bar{V} \cdot n \cdot t, \quad (1)$$

В источнике [1] предлагается аналитическое выражение реальной математической модели управления процессом формообразования оптических поверхностей с учетом обработки по круговым зонам:

$$\begin{aligned} q(\eta, \bar{S}_r, e, K, U_n) &= K \cdot n \cdot \bar{F}_r \cdot \bar{V}_r^{\text{отн}} \cdot t_r = \\ &= K \cdot n \cdot \bar{P}_r \cdot \delta_r \cdot \bar{V}_r^{\text{отн}} \cdot t_r, \end{aligned} \quad (2)$$

где η – коэффициент заполнения заготовками плана;

\bar{S}_r – коэффициент покрытия инструмента зоны обработки;

e – эксцентриситет;

U_n – коэффициент управления процессом формообразования (особенности настройки станка);

K – технологический коэффициент, учитывающий физико-химические процессы;

n – число циклов обработки оптических поверхностей;

\bar{P}_r – давление в зоне обработки;

δ_r – площадь зоны обработки;

$\bar{V}_r^{\text{отн}}$ – скоростной коэффициент перемещения полировальника относительно обрабатываемой поверхности;

t_r – время обработки поверхности в данной зоне.

Описание состава технологического оборудования как основы верификации теоретических положений исследования

Изучаемые в данной работе особенности влияния внешних факторов рассмотрены для процесса формообразования наклеечного плана плоских оптических деталей на оптическом станке рычажного типа ПД-500М. Рассмотрим принцип действия данного станочного оборудования, приведенного на рисунке 2.

В соответствии со схемой на оси шпинделя 1 закрепляют нижнее звено 2. Верхнее звено 3 устанавливают на нижнее звено 2 и соединяют с механизмом поводка 5 станка,

сообщающим ему перемещения, через шаровой шарнир 4, который обладает 3-мя степенями свободы M_x, M_y, M_z (где M – момент силы, [Н·м]). Силовое замыкание \vec{P}_y верхнего и нижнего звеньев через шаровой шарнир осуществляется механизмом поводка 5 с помощью мерного груза. При перемещении верхнего звена с частотой $n_{в.з.}$ по вращающемуся нижнему звену с частотой $n_{н.з.}$, когда между притирающимися поверхностями инструмента и детали помещена полировальная суспензия 6, происходит формообразование оптической заготовки поверхностью инструмента – при-

тира. Наличие шарового шарнира, являющееся условием применения метода свободного притира, позволяет верхнему звену свободно самоустанавливаться на поверхность нижнего звена во время их относительных перемещений и произвольно вращаться с угловой скоростью $\omega_{в.з.}$ вокруг оси вращения верхнего звена OY в направлении вращения нижнего звена под действием сил сцепления, возникающих на поверхности притирающихся звеньев. При обработке плоских деталей ось OY вращения верхнего звена параллельна оси вращения нижнего звена [1].

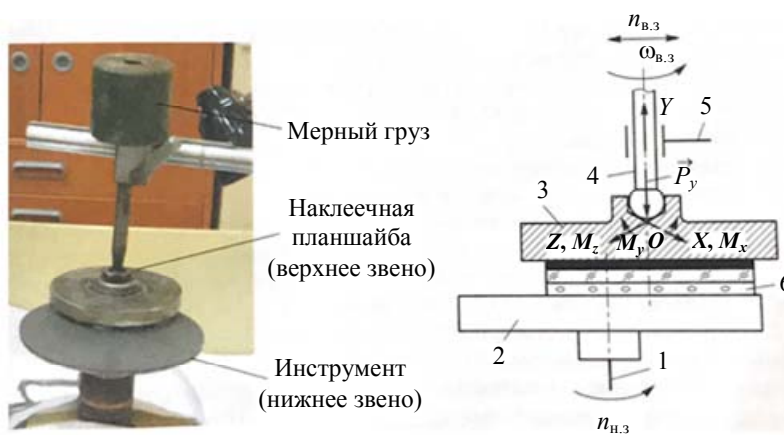


Рис. 2. Схема обработки плоских оптических поверхностей на станке ПД-500М

Сравнительный анализ существующих математических моделей функции съема оптического материала

Результаты анализа практических результатов современных источников исследования по обозначенной проблематике указывают на применимость следующих математических моделей:

1. Модель, учитывающая концентрацию полировальной суспензии

С учетом скорости относительного перемещения деталь-инструмент выражение для скорости съема оптического материала может быть записано как:

$$q_{\text{пол}}(V_r^{\text{отн}}, C, p) = K_1 (V_r^{\text{отн}})^{K_2} C^{K_3} e^{K_4} P^{K_5} e^{K_6 P}, \quad (3)$$

где $V_r^{\text{отн}}$ – скорость перемещения полировальника относительно детали, м/с; C – концентрация полировальной суспензии, г/см³; p – давление прижима, Па; K_i – технологические коэффициенты, зависящие от условий процес-

са полирования; $e = 2,718$ – основание натуральных логарифмов.

Эмпирическим подбором значений технологических коэффициентов $K_1 - K_6$ для частного случая полирования свинцово-силикатного стекла диоксидом церия и ручной подачи суспензии уравнение (2) для съема материала при полировании приведено к следующему виду [2]:

$$q_{\text{пол}}(V_r^{\text{отн}}, C, p) = 6,58 \times 10^{-3} (V_r^{\text{отн}})^{1,162} C^{0,178} 100P^{0,442} e^{(0,0013C - 0,008P)}, \quad (4)$$

2. Нелинейная модель уравнения Престона

Фактически, давление и относительная скорость могут иметь нелинейную связь со скоростью съема материала при некоторых условиях [3]:

$$q(P, V) = k \cdot P^{5/6} \cdot V^{1/2}. \quad (5)$$

Коэффициент Престона k является константой пропорциональности, которая зависит от размера частиц полирующей суспензии, а также материала и свойств заготовки.

Численные данные математических моделей (4–5), описывающих функцию съема оптического материала, были проверены на практике и не подтвердили своего применения, поэтому впоследствии осуществлялась проработка в производственных условиях рассмотренной ранее реальной модели управления процессом формообразования.

Описание экспериментальных исследований и анализ полученных данных

Изучение и анализ фундаментальных положений представленных выше математических моделей легли в основу экспериментальных исследований, целью которых являлся анализ влияния концентрации полировальной суспензии при фиксированном значении давления $p = 0,8$ атм и относительной скорости

перемещения деталь-инструмент $V_r^{\text{отн}} = 0,396$ м/с на качество обработки оптических поверхностей.

Для этого в производственных условиях было подготовлено 3 наклеечных плана с плоскими оптическими деталями диаметром 30 мм из ситалла СО-115М, которые были предварительно отшлифованы.

В качестве полирующего вещества использовался порошок полировальный для оптики марки Нева-3.3 на основе диоксида церия (IV) CeO_2 . Технические характеристики порошка приведены в таблице 1.

Процесс полирования каждого наклеечного плана осуществлялся с использованием полировальных суспензий разных концентраций, полученных путем смешивания полировального порошка с водой в соотношениях 1:1, 1:3, 1:5, соответственно. Для численной оценки полученных концентраций применялся набор ореометров, работающих по принципу Архимеда. Значения концентраций представлены в таблице 2.

Таблица 1

Характеристики порошка полировального для оптики марки Нева-3.3

Марка полировального порошка	Массовая доля суммы редкоземельных элементов (РЗЭ), %	Средний размер частиц D_{50} , мкм	Размер частиц D_{90} , мкм	Размер частиц D_{10} , мкм	Плотность, г/см ³
Нева-3.3	≥ 99	3,15–3,7	7,8–10,5	0,13–0,16	6,8–7,5

Таблица 2

Значения концентраций полировальных суспензий

№ плана	Соотношение Т:Ж	Концентрация суспензии, г/см ³
I	1:1	1,34
II	1:3	1,12
III	1:5	1,04

В ходе процесса полирования плана каждые 2,5 часа производилась оценка снятого слоя оптического материала, что позволило построить графическую зависимость (1) съема материала (мкм) от времени (ч) для каждой концентрации полировальной суспензии. Согласно данному графику с увеличением временного промежутка полирования толщина снятого оптического материала постепенно уменьшается и в точке $t = 12,5$ ч для всех планов достигает нулевого значения.

После проведения экспериментального исследования осуществлялась оценка полученной шероховатости отполированных поверхностей на основе сравнения выходных характеристик приборов контроля: динамического интерферометра NanoCam Sq и интерферометра белого света New View 6200 (NV). Измерение шероховатости проводилось для центральной и краевой детали плана. Результаты эксперимента показаны в таблице 3.

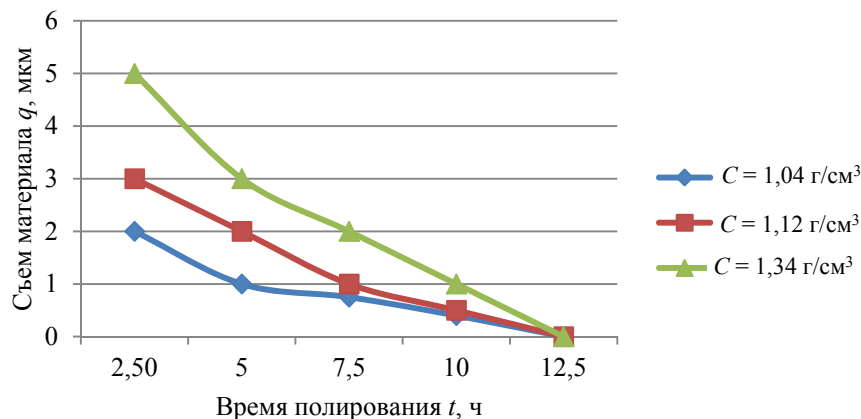


Рис. 3. Зависимость съема оптического материала от времени полирования

Таблица 3

Результаты измерений

Концентрация суспензии, г/см³	Параметр шероховатости Ra			
	Центральная деталь		Краявая деталь	
	NanoCam Sq	New View 6200 (NV)	NanoCam Sq	New View 6200 (NV)
1,04	3,4 нм	8,4 нм	0,52 нм	0,46 нм
1,12	1,095 нм	1,3 нм	0,44 нм	0,38 нм
1,34	0,55 нм	0,56 нм	0,51 нм	0,47 нм

Как видно, значения шероховатости обработанных поверхностей, полученные на разных приборах, достаточно близки, кроме центральной детали III плана (концентрация – 1,34 г/см³), что определяется принципами работы приборов. Динамический интерферометр NanoCam Sq работает в узком лотеральном

пучке, интерферометр белого света New View 6200 (NV) – в широком.

Для наглядного анализа полученных результатов ниже приведена их графическая интерпретация для центральной (рис. 4) и краевой детали (рис. 5) плана.

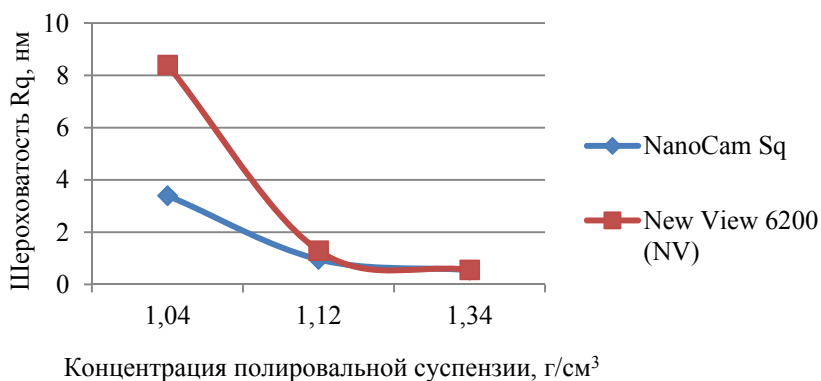


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности от концентрации полировальной суспензии (для центральной детали)

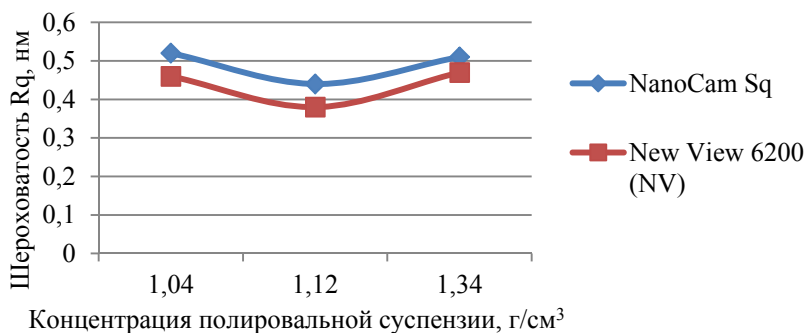


Рис. 5. Зависимость шероховатости поверхности от концентрации полировальной суспензии (для краевой детали)

Таким образом, в ходе оценки экспериментальных данных для центральной детали плана выявлена следующая зависимость: с увеличением концентрации полировальной суспензии шероховатость обработанной поверхности уменьшается. Для краевой детали плана зависимость носит неявный характер, который может быть вызван износом полировального инструмента.

Заключение

В ходе дальнейших исследований физико-химических особенностей процесса полирования планируется оценить влияние на качество обработки оптических поверхностей других факторов таких, как рН среды, t° окружающей среды, влажности, с целью автоматизации данного процесса, а также провести обработку полученных на динамическом интерферометре NanoCam Sq и интерферометре белого света NewView 6200 (NV) ин-

терференционных картин для определения частотного спектра.

Анализ графической зависимости, представленной на рис. 4, может позволить управлять параметром шероховатости и получать поверхности в соответствии с заданными требованиями, что имеет важное значение для производства высокоточных оптических изделий лазерной и космической оптики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов Д. Г. Оптические материалы и технологии. Модуль 2. Разработка технологических процессов производства типовых оптических деталей. Часть 1. Особенности формообразования поверхностей плоских оптических деталей. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020.
2. Ходаков Г. С., Кудрявцева Н. Л. Физико-химические процессы полирования оптического стекла. – М.: Машиностроение, 1985.
3. Wei-Tsu Tseng, Ving-Lang Wang. Re-examination of Pressure and Speed Dependences of Removal Rate during Chemical-Mechanical Polishing Processes - Electrochemical Society. 1997. Vol. 144. № 2. P. L15.

PACS: 42.90.+m

Study of the influence of the physical and chemical features of the polishing process on the quality of surface treatment of optical parts

V. E. Frolova¹, D. G. Denisov¹, V. E. Patrikeev², and N. A. Erofeeva²

¹ Bauman Moscow State Technical University
5 bld. 1, 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia
E-mail: v.e.frolova@mail.ru

² JSC "LZOS"
1 Parkovaya st., Lytkarino, 140080, Russia

Received May 31, 2022

A review of the current world state of shaping technology was carried out in order to ensure the effectiveness of domestic technologies. A comparative analysis of the existing mathematical models describing the function of removing optical material was performed. Approbation of the real mathematical model developed on the basis of the experimental studies in production conditions was carried out. The result of the work is the analysis of the graphic dependence of the roughness of the polished surface on the concentration of the polishing suspension.

Keywords: shaping of optical surfaces, function of removal of optical material, slurry concentration, surface roughness.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-3-85-91

REFERENCES

1. D. G. Denisov, *Optical materials and technologies. Module 2. Development of technological processes for the production of standard optical parts. Part 1. Features of shaping the surfaces of flat optical parts* (Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 2020).
2. G. S. Khodakov and N. L. Kudryavtseva, *Physico-chemical processes of polishing optical glass*. (Mashinostroenie, Moscow, 1985).
3. Wei-Tsu Tseng, Ving-Lang Wang, *Re-examination of Pressure and Speed Dependences of Removal Rate during Chemical-Mechanical Polishing Processes*. *Electrochemical Society* **144** (2), L15 (1997).