

Многофакторная модель управления формообразованием крупногабаритных оптических деталей

Д. Г. Денисов

Рассмотрены особенности технологических процессов управления формообразованием оптических поверхностей крупногабаритных плоских деталей на этапах шлифования и полирования на современных станках непрерывного формообразования полноразмерным инструментом. Дано обоснование структуры многофакторной математической модели процессов шлифования и полирования плоских оптических поверхностей на основе изучения законов движения исполнительных механизмов и зоны обработки оптических станков непрерывного формообразования полноразмерным инструментом. Приведён анализ влияния технологических факторов и физико-химических особенностей процессов обработки поверхностей плоских оптических деталей на функцию съёма оптического материала модели химико-механического метода обработки (CMP – chemical mechanical polishing). Проведён анализ исследования погрешности функции съёма оптического материала представленной многофакторной математической модели с рекомендацией к фиксации определённых значений главных кинематических параметров станочного оборудования.

Ключевые слова: математическая модель, процесс формообразования, крупногабаритная оптическая деталь, физико-химические процессы, технологический фактор, станочное оборудование, метод свободного притира, полноразмерный инструмента.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-2-85-94

Постановка научной задачи

Разработка отечественных технологий создания высокоточных оптических деталей, применяемых при проектировании оптико-электронных приборов и систем специального назначения, включая изделия астрономической и космической оптики, является одной из актуальных научно-технических задач оптических технологий XXI в. Существующие в современном оптическом производстве методы и технологическое оборудование шлифования и полирования оптических деталей ма-

лоразмерным инструментом основаны на применении итерационных подходов в расчётах съёма материала на базе разновидностей аналитического выражения формулы Престона [1–3].

Такой многостадийный технологический подход при значительных временных и человеческих затратах позволяет получать не более 30 процентов сходимости экспериментальных и теоретических результатов. Поэтому особый интерес представляет научная задача разработки единой математической модели процессов обработки оптических поверхностей, учитывающей множество физических, химических, механических и технологических факторов, в интересах реализации управляемого автоматизированного процесса обработки высокоточных оптических деталей, исключая, в перспективе, человеческий фактор. Именно поиску путей решения этой проблемы и посвящена данная работа.

Денисов Дмитрий Геннадьевич, доцент, к.т.н.
E-mail: denisov_dg@mail.ru
МГТУ им. Н. Э. Баумана.
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Статья поступила в редакцию 01 апреля 2021 г.

© Денисов Д. Г., 2021

На рис. 1 условно представлена многофакторная структура химико-механической обработки [1–3].

Как можно видеть из рис. 1, многофакторная математическая модель должна исключать человеческий фактор, обозначаемый функцией $f_3(C_k)$. Влияние параметров человека – оператора (оптика-технолога) – C_k , определяемых его знаниями, умениями, опытом и интуицией, должны быть минимизированы в представленной структуре, что позволит максимально автоматизировать процесс формообразования профилей оптических поверхностей.

Функциональная зависимость $f_1(A_i)$ обозначает совокупность взаимозависимых параметров A_i , определяемых физико-химическими процессами, происходящими между соприкасающимися поверхностями обрабатываемой оптической детали и инструмента в

вязкой среде, образованной абразивной или полирующей суспензией и смазочно-охлаждающей жидкостью. Совокупность кинематических параметров станочного оборудования, определяемая особенностями его настройки и наладки, представлена на рис. 1 функциональной зависимостью $f_2(B_j)$, где B_j – параметры настройки и наладки станка.

Важно отметить, что на сегодняшний день существующее влияние функциональной зависимости $f_3(C_k)$ ограничивает реализацию инженерного подхода к управлению формообразованием и затрудняет механизацию и автоматизацию этого процесса. Решение этих задач может идти как по пути создания принципиально новых схем обработки поверхностей, так и в направлении совершенствования существующего традиционного процесса обработки [1–3], поскольку именно к нему приспособлено современное промышленное оборудование.

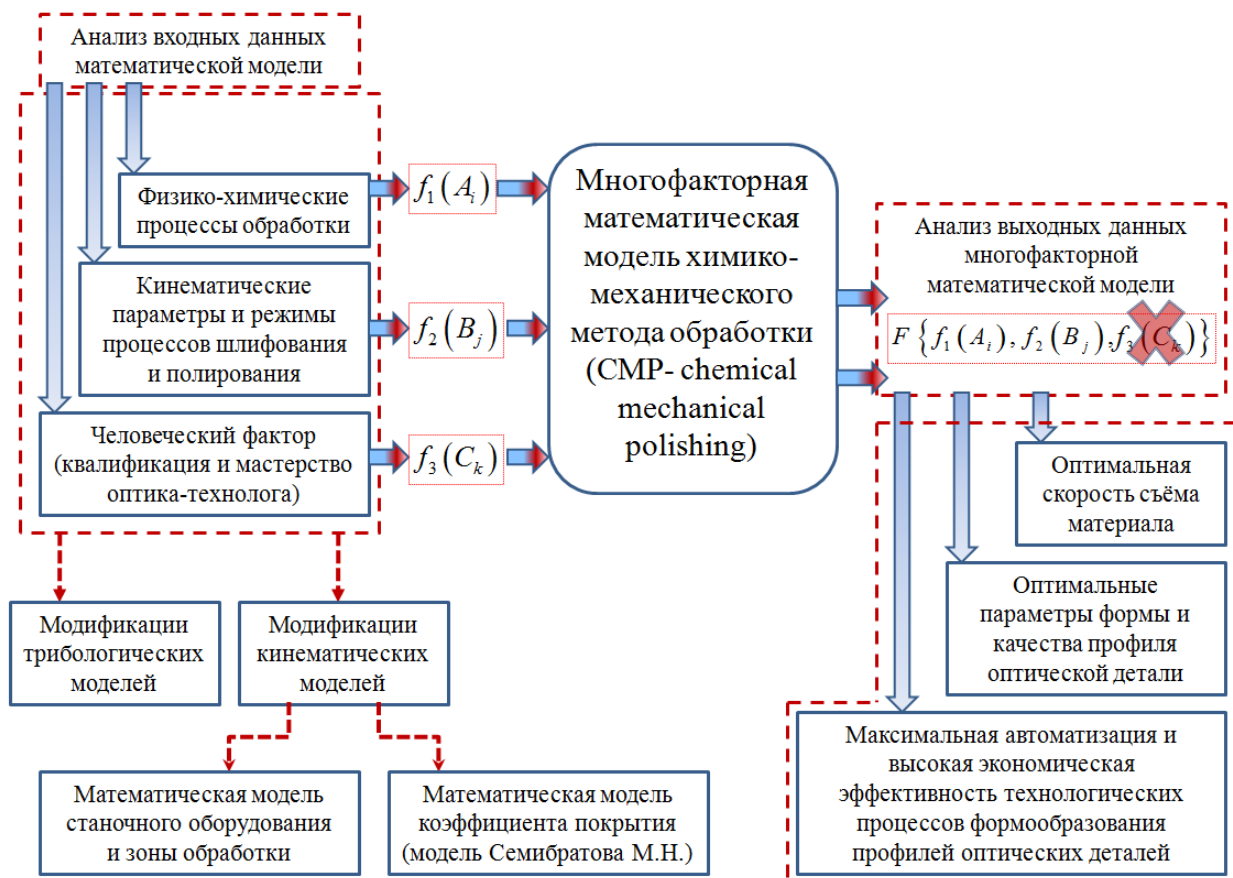


Рис. 1. Условная структура многофакторной математической модели химико-механического метода обработки (CMP – chemical mechanical polishing): $f_1(A_i)$ – функциональная зависимость параметров A_i , определяемых физико-химическими процессами; $f_2(B_j)$ – функциональная зависимость параметров B_j , определяемых кинематическими характеристиками станочного оборудования; $f_3(C_k)$ – функциональная зависимость параметров C_k , определяемых человеческим фактором.

Наглядно процессы формирования параметров и характеристик обрабатываемых исполнительных оптических поверхностей на

этапах шлифования и полирования представлены на рис. 2, а, б.

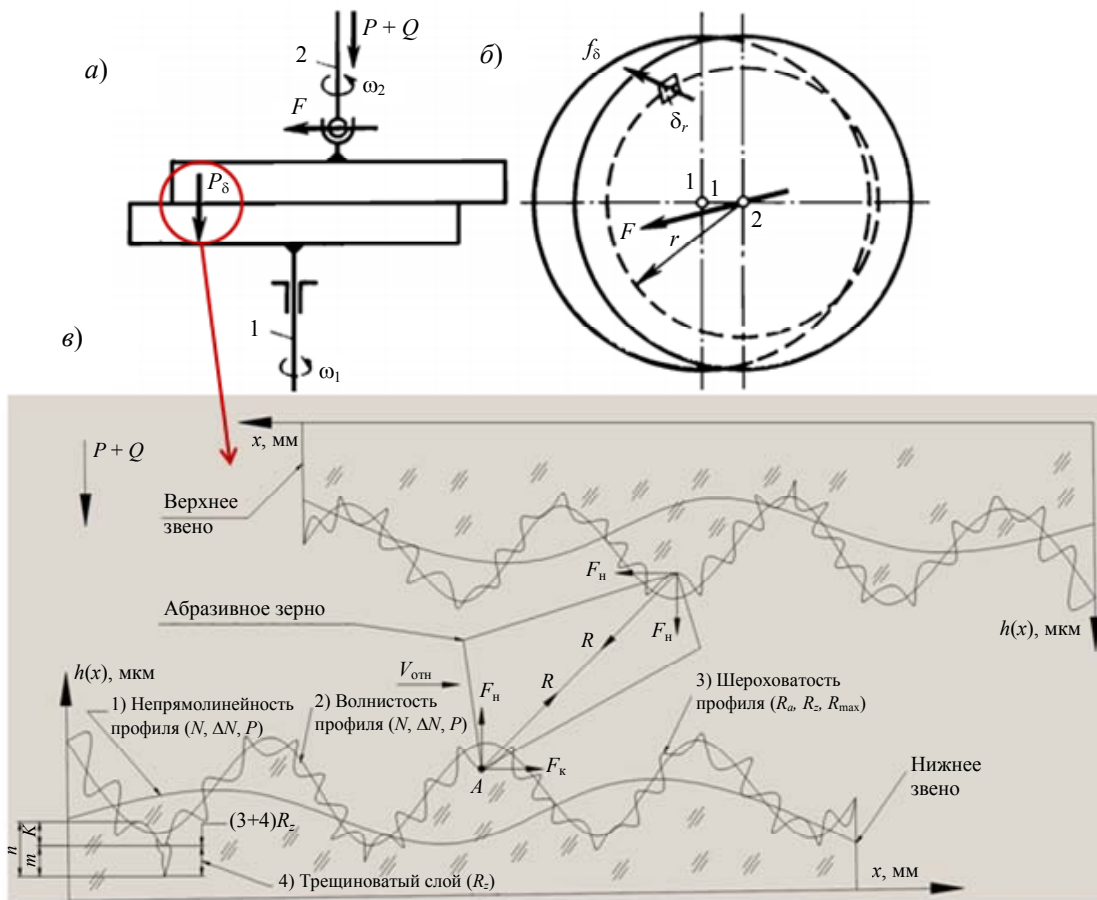


Рис. 2. Схематическое представление метода свободного притира: а) вид сбоку кинематических звеньев: \bar{P} – сила нажатия поводка оптического станка; \bar{Q} – сила тяжести верхнего звена; ω_2 – угловая скорость вращения верхнего звена; \bar{F}_k – ударно-действующая по касательной к обрабатываемой поверхности сила; \bar{P}_{δ_i} – значение элементарного давления, определяемого как отношение элементарного усилия \bar{f}_{δ_i} , приходящегося на i -ю локальную область детали с элементарной площадкой δ_i ; ω_1 – угловая скорость вращения нижнего звена; 1, 2 – обозначения осей вращения нижнего и верхнего звеньев соответственно; б) вид сверху кинематических звеньев: r – радиус кольцевой зоны обработки плоского блока оптических деталей; $\bar{\delta}_r$ – усреднённая площадь в кольцевой зоне r обработки плоского блока деталей; \bar{f}_{δ_i} – элементарное усилие, приходящееся на элементарную площадку δ_i ; в) иллюстрация физических процессов формообразования параметров и характеристик профиля оптической поверхности, формируемых на стадиях шлифования и полирования в схеме работы свободного абразивного зерна: \bar{F}_n – нормально ориентированная к обрабатываемой поверхности оптической детали сила, обеспечивающая контакт между инструментом, абразивным зерном и стеклом; $\bar{V}_{отн}$ – относительная скорость движения абразивного зерна; $\bar{R} = \sqrt{\bar{F}_k^2 + \bar{F}_n^2}$ – результирующая динамическая сила, вызывающая съём оптического материала, направленная по линии, соединяющей вершины абразивного зерна, одна из которых мгновенно закреплена в материале шлифовальника, более вязком, чем стекло, а другая вершина воздействует на стекло; $h(x)$ – функция профиля поверхности обрабатываемой оптической детали; n – глубина нарушенного слоя оптического стекла; m – глубина трещиноватого слоя оптического стекла; k – высота рельефного слоя оптического стекла; x – координата профиля поверхности обрабатываемой оптической детали вдоль оси абсцисс.

На рисунке 2, *а, б* изображены кинематические звенья (нижнее и верхнее), представляющие собой обрабатываемую поверхность и поверхность инструмента, причём верхнее звено может быть расположено на месте нижнего в зависимости от конструкции и типа оптического станка. Относительное движение «стекло – инструмент» происходит при некоторой силе нажатия верхнего звена \bar{Q} с некоторой массой M на нижнее и силе нажатия \bar{P} поводка станка, причём зерна перекачиваются или проскальзывают с некоторой линейной скоростью $\bar{V}_{\text{отн}}$ (рис. 2, *в*). Абразивные зёрна при встрече с выступами сопряжённой поверхности парного притирающегося звена получают тангенциальный удар с силой \bar{R} . Приложение нагрузки к каждому отдельному зерну имеет резко выраженный динамический характер. Динамическая сила R направлена по линии, соединяющей вершины зерна, одна из которых мгновенно закреплена в материале шлифовальника, более вязком, чем стекло, а другая вершина воздействует на стекло.

Сила \bar{F}_n направлена перпендикулярно вектору относительной скорости $\bar{V}_{\text{отн}}$ (рис. 2, *в*), поэтому не может производить работы по удалению припуска. Сила F_n обеспечивает контакт между инструментом, абразивным зерном и стеклом, вызывает появление трещин в стекле и упругих деформаций инструмента, раздавливает выступы поверхностных неровностей на стекле. Сила \bar{F}_k , являясь ударно-действующей, при удалении слоя припуска стекла направлена по касательной к обрабатываемой поверхности и вызывает изнашивание рабочей поверхности инструмента и скалывание вершин поверхностных неровностей, характеризующихся определёнными показателями качества.

Каждый из представленных на рис. 2, *в* показателей качества профиля обрабатываемой оптической детали определяется спецификой целого набора технологических факторов. Так, например, непрямолинейность и волнистость, формируемые на этапах шлифования, определяются погрешностями и структурой средств обработки (инструментов) и несовершенством процесса обработки в методе

свободного притира и характеризуются параметрами: N (предельно допустимое отклонение стрелки прогиба контролируемой поверхности от поверхности пробного стекла), ΔN (предельно допустимое отклонение формы поверхности контролируемой детали от поверхности формы пробного стекла) и P .

Анализ структуры многофакторной математической модели

При формообразовании реальной оптической поверхности необходимо учитывать ряд технологических факторов, параметров управления процессом формообразования (U_n) (рис. 1), базовых кинематических показателей управления обработкой поверхности, а также специфику, связанную с физико-химическими процессами в отдельно взятых локальных зонах обработки. В этом случае идеализированная математическая модель функции съёма оптического материала, приводимая в литературных источниках [1–3] может быть представлена в виде

$$q = K \times A = \bar{F} \times K \times \bar{V} \times n \times T, \quad (1)$$

где K – технологический коэффициент, выражающийся удельным объёмом припуска, снятого с заготовки при затрате единицы работы A с учётом действия технологических факторов; \bar{F} – среднее за временной цикл T значение вектора силы взаимодействия верхнего звена с нижним; \bar{V} – среднее за временной цикл T значение относительной скорости движения верхнего звена по нижнему; n – число циклов обработки.

Для идеализированной модели [1–3] принимают допущения, что при шлифовании $\bar{F} = P + Q/4$ и $K_{\text{шл}} = 3,8$, при полировании $\bar{F} = 2 \times (P + Q)/3$ и $K_{\text{пол}} = 3,8 \times 10^{-5}$, где P – сила нажатия поводка станка; Q – сила тяжести верхнего звена.

Однако функционально технологический параметр K зависит от множества факторов и процессов, которые представлены на рис. 2, в том числе и от шероховатости оптической поверхности, играющую роль коэффициента трения, которая на разных стадиях формообразования различная.

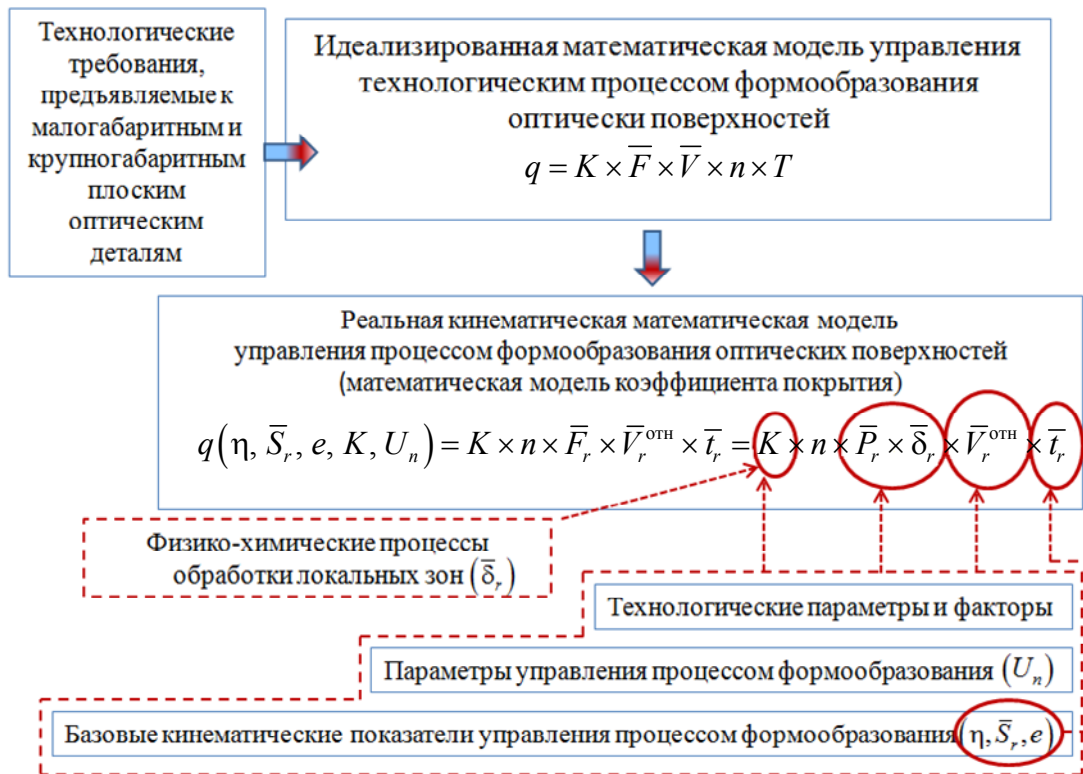


Рис. 3. Многофакторная математическая модель управления процессом формообразования плоских поверхностей оптических деталей: η – коэффициент заполнения наклеечной планшайбы (верхнего звена) заготовками оптических деталей; \bar{S}_r – коэффициент покрытия рабочей зоной инструмента зоны обработки оптических деталей; e – эксцентриситет между осями верхнего и нижнего звеньев оптического станка.

Как можно видеть из рис. 3, для финишной обработки прецизионных поверхностей в условиях свободной притирки характерно сложное распределение относительных скоростей скольжения $\bar{V}_r^{\text{отн}}$ и давления \bar{P}_r в локальной зоне контакта r с площадью $\bar{\delta}_r$. Не одинаковым для различных зон сопряжённых поверхностей является время обработки t_k , что обусловлено выходом верхнего звена за край нижнего. В результате съём припуска оптического материала q с заготовки и изнашивание инструмента также происходят неравномерно. Поэтому аналитическое определение формы обработанной поверхности детали и изношенной рабочей поверхности инструмента является сложной задачей, решение которой необходимо начинать с определения геометрических и кинематических связей используемого технологического оборудования, а также технологических параметров метода управления формообразованием и сопутствующих им физико-химических процессов.

В качестве реальной многофакторной математической модели (см. рис. 3), позволяющей реализовывать процесс управления функцией съёма оптического материала с поверхности оптической детали, рассмотрим следующее выражение

$$q(\eta, \bar{S}_r, e, K, U_n) = K \times n \times \bar{P}_r \times \bar{\delta}_r \times \bar{V}_r^{\text{отн}} \times \bar{t}_r, \quad (2)$$

где η – коэффициент заполнения наклеечной планшайбы (верхнего звена) заготовками оптических деталей; \bar{S}_r – коэффициент покрытия рабочей зоной инструмента зоны обработки оптических деталей; e – эксцентриситет осей верхнего и нижнего звеньев; K – технологический коэффициент зависящий от физико-химических процессов обработки, кинематических параметров и режимов процессов шлифования и полирования, адиабатических характеристик окружающей среды (температуры, давления); U_n – параметры управления процессом формообразования; n – число цик-

лов обработки; $\bar{P}_r = \sqrt{\frac{1}{i} \times \sum_{i=1}^m (P_i - \bar{P}_i)^2}$ – среднее рабочее давление или среднеквадратическое значение рабочего давления в зоне r приходящееся на её усреднённую площадь – $\bar{\delta}_r$ за временной цикл T ; P_i – значения элементарных усилий, приходящихся на i -ю локальную область детали с элементарной площадкой δ_i ; $\bar{V}_r^{\text{отн}}$ – модуль среднего значения вектора относительной линейно скорости в зонах r за временной цикл T (скоростной коэффициент); \bar{t}_r – среднее рабочее время, т. е. среднее значение времени обработки зон r , взятое за временной цикл T .

Применим выражение (2) для кинематической схемы обработки крупногабаритной

оптической детали типа слэба (активного элемента лазерного генератора для создания термоядерного синтеза) на станке типа FLP-4000, фотография которого и процесс обработки на котором изображены на рис. 4, а, б.

Для численного анализа выражения (2) и оценки точностных ограничений входящих в него параметров необходимо определить выражение для значения относительной скорости $v_{i \text{отн}}$. С этой целью изобразим кинематическую схему процесса формообразования крупногабаритной оптической детали полноразмерным инструментом и определим искомую функцию, используя ряд геометрических преобразований.

Для приведённых на рис. 4, а, б особенностей движения верхнего звена (оптической детали) и нижнего звена (полноразмерного инструмента) изобразим кинематическую схему обработки, представленную на рис. 5.

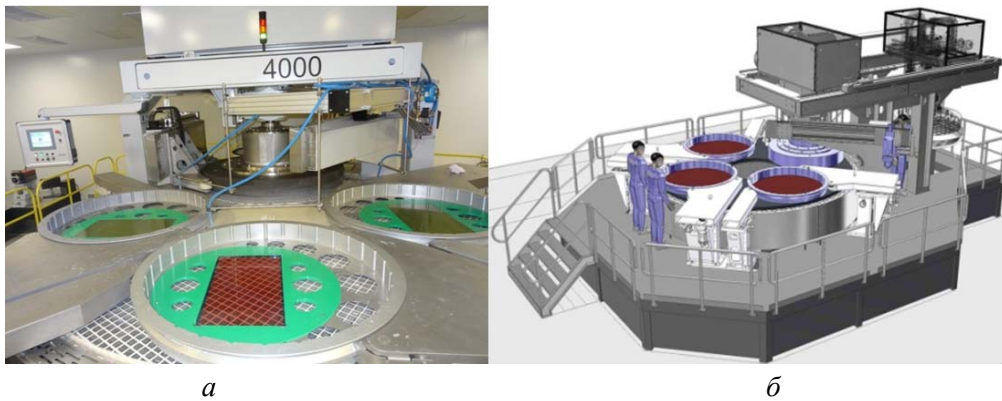


Рис. 4. Процесс обработки крупногабаритных оптических деталей полноразмерным инструментом методом свободного притира на станке FLP-4000: а) фотография процесса обработки в конструкциях сепараторного типа; б) общий вид станка с зонами обработки крупногабаритных оптических деталей.

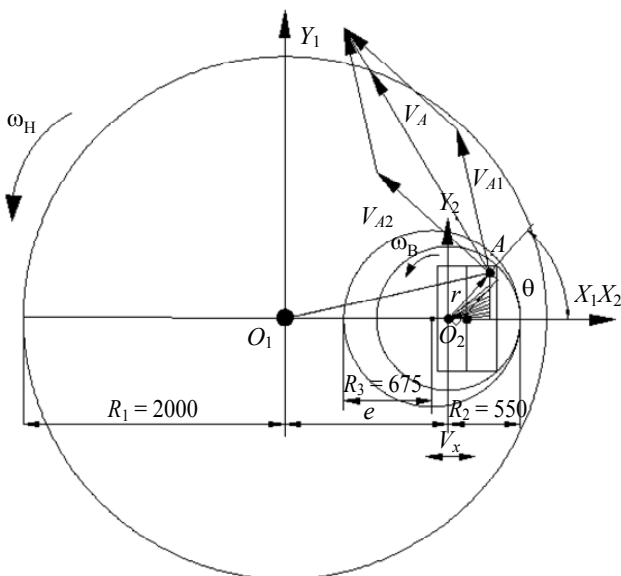


Рис. 5. Кинематическая схема обработки на станке типа FLP-4000: ω_H , ω_B – угловые скорости нижнего и верхнего звеньев оптического станка; V_A – относительная скорость в зоне обработки для точки A ; V_{A1} – тангенциальная составляющая скорости вращения точки A на поверхности нижнего звена оптического станка; V_{A2} – тангенциальная составляющая скорости вращения точки A на поверхности верхнего звена оптического станка; e – эксцентриситет между осями вращения кинематических звеньев оптического станка; r – радиус вектор, характеризующий положение точки A на поверхности оптической детали в заданной зоне (области) обработки; θ – угол, между радиус-вектором r и осью абсцисс системы координат кинематических звеньев оптического станка, характеризующий положение точки A на поверхности оптической детали в заданной зоне (области) обработки; R_1 , R_2 , R_3 – геометрические размеры кинематических звеньев оптического станка.

Согласно рис. 5, выразим аналитическую зависимость значения относительной скорости $V_{i_отн} = V_A$ в зоне (области) обработки i для точки A на поверхности детали от кинематических параметров обработки: радиус-

вектора r и угла θ , угловых скоростей ω_H, ω_B нижнего и верхнего кинематических звеньев соответственно, а также величины эксцентриситета e в виде следующего выражения:

$$V_{i_отн} = V_A = \sqrt{(\omega_H - \omega_B)^2 \times r^2 + (e \times \omega_H)^2 + 2 \times r \times e \times \omega_H \times (\omega_H - \omega_B) \times \sin(\alpha - \beta)}, \quad (3)$$

где $\alpha = \theta - \omega_H \times t + \omega_B \times t, \beta = \omega_H \times t, e$ – эксцентриситет.

Подставив последнее выражение в формулу (2), получим окончательно аналитическую зависимость скорости съема материала от кинематических параметров обработки в виде:

$$q(k_i, p_i, v_{i_отн}) = k_i \times p_i \times \sqrt{(\omega_H - \omega_B)^2 \times r^2 + (e \times \omega_H)^2 + 2 \times r \times e \times \omega_H \times (\omega_H - \omega_B) \times \sin(\alpha - \beta)}. \quad (4)$$

Анализ результатов численного моделирования

С целью численного анализа выражения (4), зададимся следующими исходными данными для кинематических параметров, входящих в него. Эти данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для численного анализа функции съема материала

№	Кинематический параметр	Значение
1	$\omega_H, \text{мин}^{-1}$	0,5–20
2	$\omega_B, \text{мин}^{-1}$	0,35–14
3	$e, \text{мм}$	5–10
4	$K, \text{м}^2 \text{с/Г}$	$1 \times 10^{-11} \div 10^{-6}$
5	$P, \text{Па}$	$1200,54 \times 10^3$

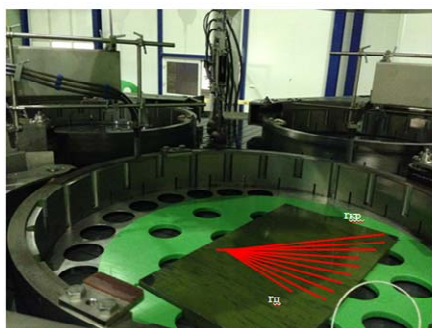
При этом величина давления P определяется силой, с которой давит площадь обра-

батываемой детали на поверхность полноразмерного инструмента, численно может быть найдена следующим образом:

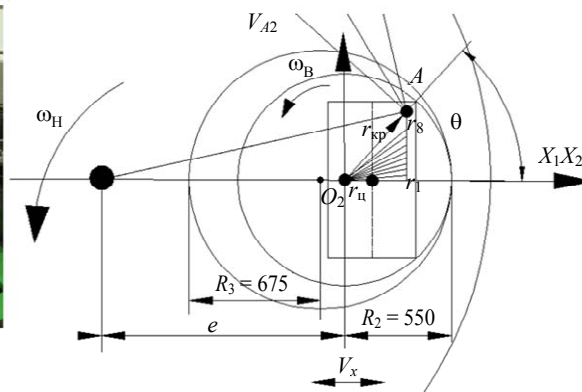
$$P = \frac{m \times g}{S} = \frac{(h \times S \times \rho) \times g}{S} = \rho \times g \times h = 1205,4 \times 10^3 \text{ Па},$$

где $S = 808 \text{ мм} \times 452 \text{ мм} = 0,365 \text{ м}^2$ – площадь поверхности обрабатываемого изделия, $\text{мм}^2, m$ – масса изделия, $g = 10 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, $\rho = 2,87 \text{ г/см}^3 = 2,87 \times 10^6 \text{ г/м}^3$ – плотность материала КНФС-3 (концентрированного фосфатного стекла), $h = 42 \text{ мм} = 0,042 \text{ м}$ – высота изделия.

Значения угловых координат, определяющих положения точек в зоне обработки (т. A) на поверхности крупногабаритной оптической детали будем определять по рис. 6, а, б на основе схемы, представленной на рис. 5, поясняющей кинематику движения звеньев.



а



б

Рис. 6. Выделение зон обработки на поверхности крупногабаритной оптической детали в кинематической схеме обработки полноразмерным инструментом на станке типа FLP-4000: а) – фотография внешнего вида зон обработки; б) – расчётная схема определения угловых координат зон обработки (т. A).

Согласно расчётной схеме, представленной на рис. 6, б, выделим зоны обработки на поверхности оптической детали с целью последующего анализа съёма материала в них (см. табл. 2).

Таблица 2
Исходные данные для зон обработки по угловым координатам на поверхности обрабатываемой детали

№	Угловые координаты зон обработки	
0	$r_{ц} = 141,9$ мм	$\theta_{ц} = 0^\circ$
1	$r_1 = 319,56$ мм	$\theta_1 = 5^\circ$
2	$r_2 = 322,75$ мм	$\theta_2 = 10^\circ$
3	$r_3 = 329,57$ мм	$\theta_3 = 15^\circ$
4	$r_4 = 337,78$ мм	$\theta_4 = 20^\circ$
5	$r_5 = 351,25$ мм	$\theta_5 = 25^\circ$
6	$r_6 = 367,95$ мм	$\theta_6 = 30^\circ$
7	$r_7 = 391,44$ мм	$\theta_7 = 35^\circ$
8	$r_8 = 415,56$ мм	$\theta_8 = 40^\circ$
9	$r_{кр} = 474,17$ мм	$\theta_{кр} = 45^\circ$

Для исходных данных, обозначенных в табл. 1 и 2, построим функцию скорости съёма материала по выражениям (3), (4), а также определим погрешность этой функции в частных производных согласно выражению

$$q(k, p, V) = \left[\left(\left(\frac{\partial q(k)}{\partial k} \right) \times (\Delta k) \right)^2 + \left(\left(\frac{\partial q(p)}{\partial p} \right) \times (\Delta p) \right)^2 + \left(\left(\frac{\partial q(V)}{\partial V} \right) \times (\Delta V) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Для исходных данных: $\omega_H = 0,1665$ об/с (10 об/мин), $\omega_B = 0,1165$ об/с (7 об/с), $e = 5 \times 10^{-3}$ м, $k = 1 \times 10^{-11}$ м² с/г были получены следующие их распределённые погрешности: $\Delta k = 1 \times 10^{-12}$ м² с/г; $\Delta p = 0,1$ Па; $\Delta V = 1 \times 10^{-3}$ м/с.

Результат проведённого математического моделирования для функции съёма оптического материала и её погрешности, полученные на основе исходных данных, представлены на рис. 7.

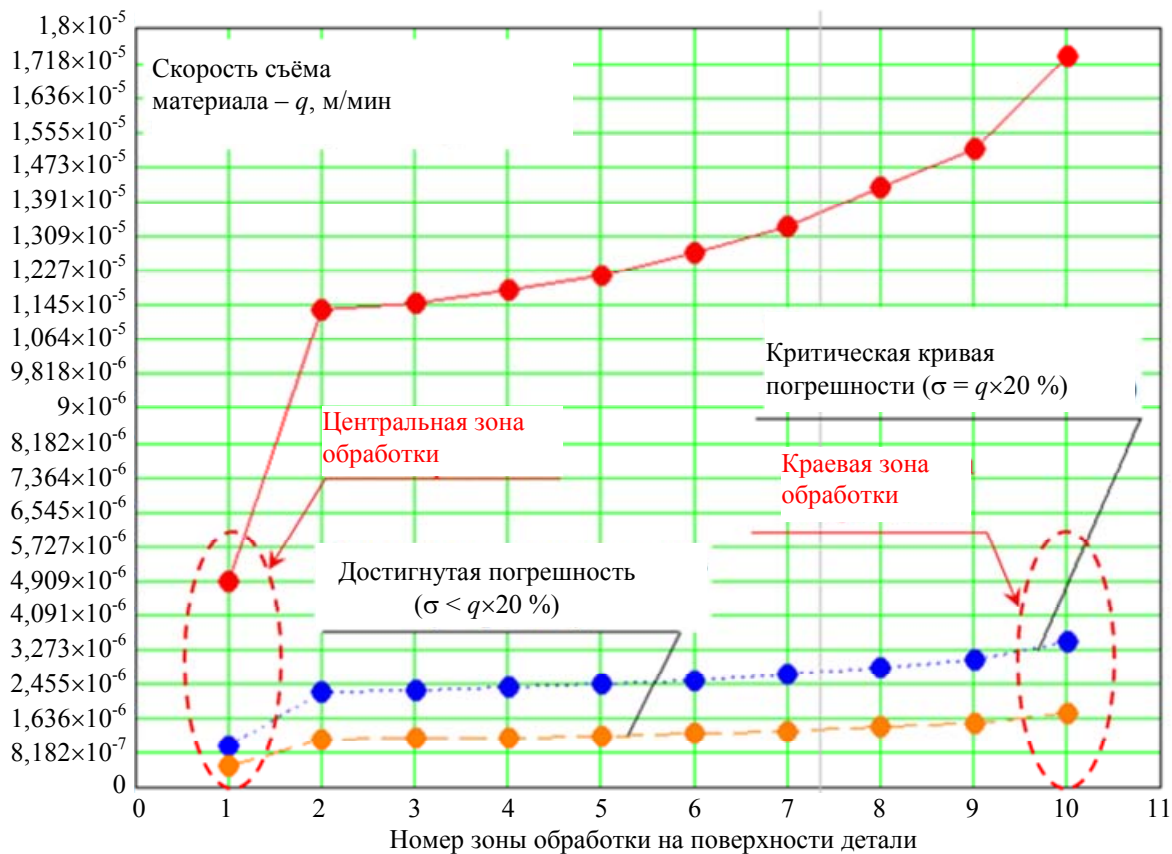


Рис. 7. К определению погрешностей параметров многофакторной математической модели.

Как можно видеть из рис. 7, для выделенных зон на поверхности обрабатываемой крупногабаритной оптической детали минимальная скорость съёма оптического материала соответствует центральной зоне, а максимальная – краевой зоне.

Достигнутая погрешность скорости съёма материала в зонах обработки не превышает 20 % от максимальных значений самой скорости съёма, что вполне удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к управлению процессом формообразования крупногабаритных оптических деталей [1–3].

Заключение

Проведённый анализ численного решения уравнения (4) для съёма оптического материала был представлен в упрощённой форме, так как технологический параметр K задан случайным образом (см. табл. 1), однако на практике задача определения данного параметра является сложной и неоднозначной, требующей учёта влияния экспериментальных данных многофакторности рассматриваемой математической модели. Тем не менее полученные решения позволяют перейти к задачам автоматизации процесса управления формообразованием крупногабаритных оптических деталей с учётом влияния многофакторности рассмотренной модели, определяемой в большей степени технологическим параметром K .

Для определения параметра K в дальнейшей научной работе предлагается решать обратную оптическую задачу, связанную с восстановлением профиля снимаемого ма-

териала с минимальной погрешностью при измерении различных факторов, входящих в параметр K . Среди данных факторов, может быть шероховатость оптической поверхности, измеренная экспериментально различными приборами, начиная от стадии грубого шлифования (ИК – интерферометрами [4, 5] и шуповыми профилометрами), заканчивая стадией глубокой полировки, когда уровень поверхностных неоднородностей достигает значения 0,4–0,5 нм (высокоточными динамическими интерферометрами [6], интерферометрами белого света, приборами контроля шероховатости на основе регистрации рассеянного излучения). Так же могут быть измерены специализированными датчиками и учтены в нахождении параметра K , такие адиабатические характеристики, как: температура, давление и уровень кислотности pH в зоне обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козерук А. С., Юринок В. И., Кузнечик В. О., Филонова М. И., Шамкалович В. И. // Наука и техника. 2013. № 5. С. 27.
2. Гавришук Е. М., Комаров В. Н., Метрикин В. С., Панасенко А. Г. // Известия Самарского НЦ РАН. 2011. Т. 13. № 3. С. 992.
3. Zantye P. B., Kumar A., Sikder A. K. // Material Sci. and Engineering. 2004. Vol. 45. P. 89.
4. Денисов Д. Г., Карасик В. Е., Орлов В. М. // Метрология. 2009. № 9. С. 15.
5. Денисов Д. Г., Карасик В. Е. // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2011. № 2. С. 36.
6. Денисов Д. Г. // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 6. С. 820.

Analysis of the error of the optical material removal function in a multivariate mathematical model for controlling the shaping process large optical parts

D. G. Denisov

E-mail: denisov_dg@mail.ru

Bauman Moscow Technical University
5 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia

Received April 01, 2021

The features of technological processes for controlling the shaping of the optical surfaces of large-sized flat parts at the stages of grinding and polishing on modern machines of continuous shaping with a full-size tool. The substantiation of the structure of a multifactorial mathematical model of the processes of grinding and polishing of flat optical surfaces is given on the basis of studying the laws of motion of actuators and the processing zone of optical machines of continuous shaping with a full-size tool. The analysis of the influence of technological factors and physicochemical features of the processes of processing surfaces of flat optical parts on the function of removing the optical material of a model of chemical mechanical polishing (CMP) is presented. The analysis of the study of the error of the optical material removal function of the presented multivariate mathematical model with the recommendation for fixing certain values of the main kinematic parameters of machine equipment is carried out.

Keywords: mathematical model, shaping process, large-sized optical part, physicochemical processes, technological factor, machine tool equipment, free lapping method, full-size tool.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-2-85-94

REFERENCES

1. A. S. Kozeruk, V. I. Yurinok, V. O. Kuznechik, M. I. Filonova, and V. I. Shamkalovich, Science and technology, No. 5, 27 (2013).
2. E. M. Gavrishchuk, V. N. Komarov, V. S. Metrikin, and A. G. Panasenko, Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, **13** (3), 992 (2011).
3. P. B. Zantye, A. Kumar, and A. K. Sikder, Material Sci. and Engineering **45**, 89 (2004).
4. D. G. Denisov, V. E. Karasik, and V. M. Orlov, Metrology, No. 9, 15 (2009).
5. D. G. Denisov and V. E. Karasik, Bulletin of the Moscow State Technical University. N. E. Bauman. Series: Instrument making, No. 2, 36 (2011).
6. D. G. Denisov, Computer Optics **41** (6), 820 (2017).