

На правах рукописи

Колодяжный Алексей Юрьевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАЦИЙ
ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ И ДОВОДКИ ЗАГОТОВОК
ИЗ ВЫСОКО ТВЕРДОЙ КЕРАМИКИ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт - Петербург 2004

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» в ГОУ ВПО «Санкт – Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Никитков Николай Валентинович

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Кремень Зиновий Ильич

доктор технических наук, профессор
Зубарев Юрий Михайлович

Ведущая организация - ОАО «Научно - исследовательский
институт «Гириконд» Санкт–Петербург

Защита состоится «30» марта 2004 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.26 в ГОУ ВПО «Санкт–Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:

195251, г. Санкт – Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус 1, аудитория 41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт–Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан “ 17 ” февраля 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Тисенко В.Н.

1. Общая характеристика работы

В диссертации представлены результаты исследований, связанные с повышением эффективности обработки плоских поверхностей заготовок из высокотвердых керамик при торцовом шлифовании и доводке с заданным постоянным давлением в зоне резания.

Актуальность.

Научно-технический прогноз развития машиностроения в мире на ближайшие 5-10 лет свидетельствует о существенном росте (до 40%) применения вместо металлов конструкционной керамики, особенно жаростойкой, для изготовления деталей двигателей, летательных аппаратов, турбин, деталей станков и других устройств. Конструкционная керамика (structural ceramic) должна отвечать высоким механическим, термическим и трибологическим требованиям. Проектирование деталей и технологий их обработки нуждаются в инженерном расчете.

Эффективность технологий и повышенные требования к качеству изделий из керамик реализуются только посредством нетрадиционных решений применения алмазного инструмента и оборудования.

Поэтому новые теоретические, методические и технические решения для производительной, бездефектной и качественной алмазной обработки керамических заготовок представляют собой актуальную научно – техническую разработку, обеспечивающую решение важной прикладной задачи.

Цель работы.

Разработать теоретические, методические и технические решения повышения эффективности шлифования и доводки алмазными кругами формы 6А2, внедрить в промышленность эффективные технологии изготовления плоских качественных деталей из реакционно спеченного карбида кремния (далее РКК).

Основные задачи исследования.

- Исследовать экспериментально характер микро разрушения от действия алмазных зерен кругов на поверхность заготовок.
- Создать феноменологические и математические модели воздействия на поверхность заготовок алмазных зерен кругов, позволяющие вычислять силы разрушения в контакте зерно – заготовка, параметры видов разрушения материала в контакте и управлять видом разрушения, режущей способностью кругов, глубиной трещин в поверхностном слое заготовок на этапе проектирования технологий.
- На основе математических моделей и полученных экспериментально эмпирических зависимостей создать модель проектирования шлифовальных и доводочных операций кругами формы 6А2, разработать алгоритмы управления показателями эффективности шлифовальных операций.

- Получить математическую модель взаимодействия поверхностей типа “кольцо ” инструмента и заготовки, описывающую связь геометрических и кинематических параметров с величиной отклонения от плоскостности поверхности кольца.
- Разработать методику по проектированию эффективных операций и внедрить в производство технологии обработки заготовок из конструкционных керамик.

Методика исследований и достоверность результатов.

Перечисленные выше задачи решались комплексным методом аналитического, численного и экспериментального исследования. Используются научные основы технологии машиностроения, механики разрушения материалов, математической статистики, математического моделирования и планирования экспериментов. Исследование разрушения микрообъемов материала заготовок производилось с использованием склерометрирования. Экспериментальные исследования выполнены на лабораторном и производственном оборудовании с применением современных метрологических аттестованных средств. Вычисляемые по моделям параметры операций и их показатели эффективности, проверены экспериментально на действующем оборудовании и удовлетворяют требованиям производства, что подтверждает их достоверность.

На защиту выносятся:

Теоретические и экспериментальные исследования в области повышения эффективности чернового шлифования, а также чистовой обработки – доводки мелкозернистыми алмазными кругами и разработанные на базе этих исследований технологии, внедренные в промышленность.

Научная новизна.

1. Созданы феноменологические и математические модели воздействия на поверхность заготовок алмазных зерен кругов, позволяющие вычислять силы разрушения в контакте зерно – заготовка, параметры видов разрушения материала в контакте и управлять видом разрушения, режущей способностью кругов, глубиной трещин в поверхностном слое заготовок на этапе проектирования технологий.
2. На основе математических моделей по п. 1 и полученных экспериментально эмпирических зависимостей создана обобщенная модель проектирования шлифовальных и доводочных операций кругами формы 6А2, разработаны алгоритмы управления показателями эффективности операций.
3. Получена математическая модель взаимодействия торцовых поверхностей типа “кольцо” инструмента и заготовки, описывающая связь геометрических и кинематических параметров с величиной отклонения от плоскостности торца изготовленной детали.

Практическая ценность.

На основе теоретических и экспериментальных исследований торцового шлифования и доводки алмазными кругами заготовок из твердой и прочной керамики достигнуто:

- Режущая способность ($Q, \text{см}^3/\text{мин}$) кругов формы 6A2 и производительность круга выше на 60-65%, а расход алмазов на $\sim 15\%$ меньше, чем при шлифовании кругами формы 1A1 и 12A2 заготовок из материала РКК (SiC).
- Относительная режущая способность ($\text{см}^3/\text{карат}$) кругов формы 6A2 на $\sim 15\%$ больше, чем при периферийном шлифовании кругом формы 1A1 или скоростном - 12A2 заготовок из керамики РКК (SiC).
- Применение низко скоростной доводки кругами формы 6A2 позволяет автоматизировать процесс штучной обработки, при этом обеспечивается повышение режущей способности в 1,6 раза, а шероховатость поверхности $Ra \leq 0,04$ мкм.
- Создан опытный экземпляр станка типа СШП 2 и внедрен в промышленность.

Реализация работы в промышленности. Разработанные технологии изготовления плоскостных деталей из твердых керамик испытаны и внедрены на предприятии

Апробация работы.

Основные положения диссертации доложены на семинаре в рамках международной специализированной выставки инструмента, станков и промышленных технологий "Обработка металла - 2003", г. С – Петербург; Международной научно – практической конференции (Качество поверхностного слоя деталей машин), 24-26 июня 2003, ПИМаш, С-Петербург; Молодежной научно-технической конференции "Молодежь Поволжья – науке будущего ЗМНТК-2003", Ульяновск; Межвузовской научной конференции (XXVII неделя науки) СПбГТУ 7-12 декабря 1998г., С.-Петербург; Научно-техническом семинаре «Совершенствование технологии и повышение эффективности механообрабатывающих производств» 13-15 апреля 1999 г., С.-Петербург; Международной научно-технической конференции «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы» ШЛИФАБРАЗИВ-99 6-11 сентября 1999 г., г. Волжский.

Публикации.

По результатам диссертационной работы опубликовано 8 печатных работ.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и практических выводов, списка использованной литературы и приложения. Диссертация изложена на 143 страницах машинописного текста, содержит 75 рисунков, 16 таблиц, 6 приложений, 127 наименований литературных источников. Общий объем работы составляет 218 страниц.

2. Основное содержание работы.

Введение. Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическая ценность результатов работы, приведены данные о реализации основных положений диссертации. Настоящая работа является продолжением исследований в области алмазной обработки заготовок из твердых материалов авторов Грабченко А.И, Кремня З.И., Лоладзе Т.Н., Никиткова Н.В., Орлова П.Н., Чеповецкого И.Х., Арай Нобухико и других.

В первой главе дан анализ состояния вопроса эффективного изготовления качественных деталей из высокотвердой керамики. Область применения керамических деталей быстро расширяется: это детали турбин и космических аппаратов, подпятники, подшипники станков, насосов, детали электронных приборов и радаров, пластины резцов и т.д. Изделия из разных марок керамики работают при температурах от -40 до 1800 градусов Цельсия. Из общего объема призматические и плоскостные детали составляют $\sim 65\%$, причем $\sim 50\%$ - детали 7...12 квалитетов, $Ra > 0,02$ мкм, глубиной T_a дефектного слоя до 40 мкм, а $\sim 15\%$ - 5...6 квалитетов, $Rz = 0,001...0,1$ мкм. Твердость разных керамик составляет (0,1...0,3) твердости алмаза. Проблема создания эффективных технологий производства качественных керамических деталей решается в мире путем создания специализированного повышенной жесткости оборудования, алмазного инструмента, оригинальных устройств и способов обработки. Реализуются две схемы в конструкции станков: шлифование с постоянной подачей или давлением на заготовки. Из-за хрупкости керамик последнее (давление) предпочтительнее. Фирмами Yamuzaki Machinery Co., Kuroda Seiko созданы станки для нанотехнологии, обеспечивающие обработку поверхностей с $Rz = 0,005$ мкм. В отечественном станкостроении пока мало создано специальных станков для обработки керамики.

Особенность существующих технологий – это применение металлорежущих универсальных станков для шлифования заготовок из керамики, неэкономичное использование алмазного инструмента, отсутствие эффективных технологий, наличие многих переходов и инструментов последовательно меньшей зернистости для получения качественных поверхностей и т.п. В мире разработано много математических моделей для объяснения процессов хрупкого, квазихрупкого и упругопластического разрушения поверхностного слоя заготовок зернами инструментов с целью поиска путей получения качественной поверхности. Однако, пригодные для технологического использования модели до сих пор отсутствуют.

На основании изложенного выше сформированы цель и задачи исследований.

Во второй главе приведена методика исследований. Дано описание оборудования, инструментов и заготовок для исследований, методов измерения износа зерен в инденторах и кругах, режущей способности кругов, показателей качест-

ва поверхности, относительной опорной поверхности, силового взаимодействия вершин зерен с микрообъемами материала на поверхности заготовок, определения видов разрушения и образования трещиноватого слоя под шероховатой поверхностью. Описаны математические методы и пакеты программ для обработки результатов исследований.

Третья глава посвящена теоретическому анализу механизмов разрушения поверхностного слоя при алмазном шлифовании плоских заготовок деталей из РКК и формирования качественной поверхности. Выполнено экспериментальное сопоставление наиболее распространенных в промышленности видов шлифования керамических заготовок: периферией кругов формы 1А1, скоростного - чашечными кругами формы 12А2 и низко скоростного – кругами формы 6А2. На основе теорий микро пластичности и хрупкого разрушения разработана феноменологическая и математическая модель **F** (рис. 1 и 3) видов разрушения зерном круга микрообъемов материала на поверхности заготовок и наибольшей глубины T_a трещин (модель **H**).

Переменные в модели: характеризующие алмазный инструмент - I_H , W_H , $M(\bar{l}/D1)$, $\alpha = b/\bar{l}$ и заготовки: μ , τ_0 , E , HV , α_0 , d_0 , γ .

При разработке модели сделаны допущения:

- Алмазные зерна в кругах заменены эквивалентными, имеющими математическое ожидание длины \bar{l} , среднее квадратическое отклонение длины σ_l , коэффициент изометрии α , вершины зерен представляют собой параболоиды вращения с фокальным параметром p .
- Сила ΔP_N направлена по нормали к поверхности зерна в точке контакта, а расчетный радиус в точке контакта равен радиусу кривизны образующей параболы параболоида вращения, описывающего вершину зерна.
- Силы ΔP_N незначительно (на 1 – 4%) зависят от скорости V обработки и пористости (P_0) керамики ($E_3=(1...1,07) \cdot E$), наличия и типа применяемой СОЖ, так как при вмятии зерен в материал практически отсутствует скольжение, а следовательно, трение.
- Хрупкие поликристаллические керамики обладают низкой пористостью (до 5%).
- Тепловой фактор оказывает несущественное влияние на трещинообразование. Твердость материала зерен значительно превышает твердость обрабатываемых материалов.

В результате анализа моделей F и H установлено:

- Упруго пластически могут разрушать микрообъем заготовки зерна с радиусами меньше r_{xp} при внедрении в материал на глубину t до линии t_{yn} , ограничивающей сверху зону I (рис. 2). Во всех остальных случаях деформирование начинается упруго, упруго пластически, квазихрупко и переходит в полное хрупкое разрушение по мере увеличения глубины t внедрения зерна в материал заготовок.

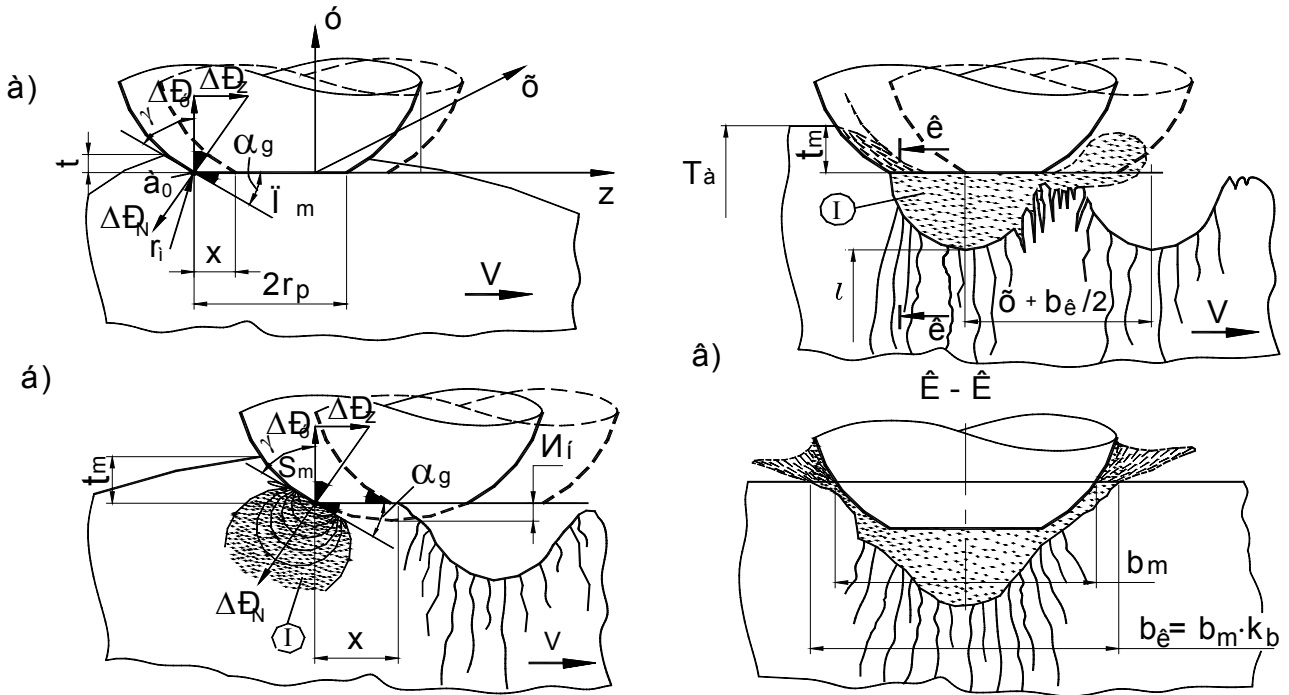


Рис.1. Феноменологическая модель упругого деформирования (а) зернами микро выступов поверхности заготовок, начального (б) и полного хрупкого (б, в) разрушения с вытеснением материала из зоны I (изохромы - наибольшие касательные напряжения, Π_m – поверхность контакта передней грани зерна с заготовкой).

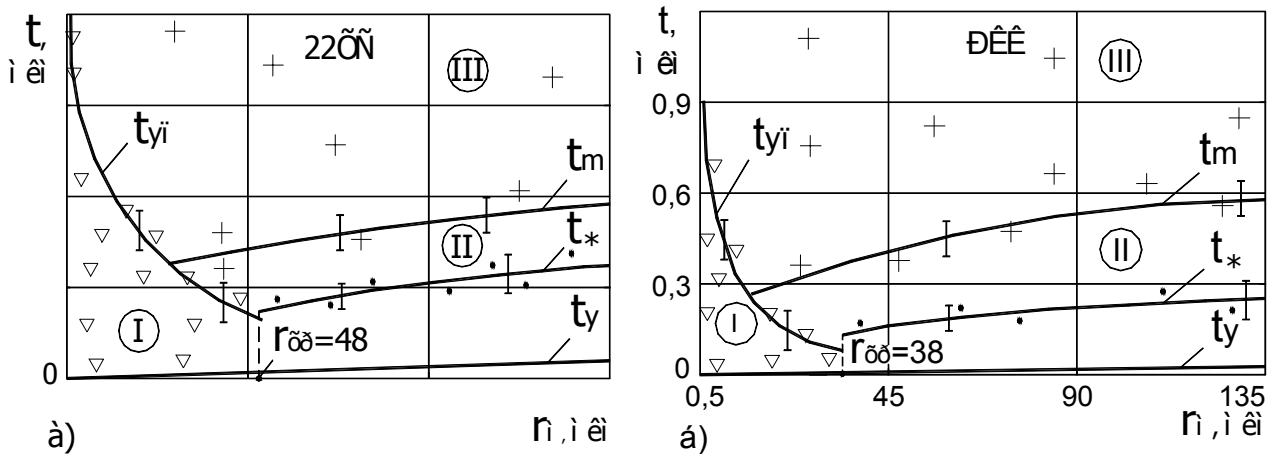


Рис.2. Характер разрушения материала заготовок при внедрении на глубину t (мкм) зерен с радиусами при вершине r_m : а) для материала 22ХС, б) для материала РКК (SiC); I - зона пластичного разрушения материала, II - зона квазихрупкого разрушения, III - зона хрупкого разрушения; t_y – линия предела упругих деформаций, t_* – линия начала квазихрупкого разрушения, t_m – линия начала полного хрупкого разрушения, t_{yII} – линия предела пластичных деформаций, r_{0p} – предельное значение радиуса вершины зерен, производящих пластичное разрушение.

$$\begin{aligned}
 & t_y = \kappa \cdot r_m \cdot \left[\frac{1 - \mu^2}{E} \right] \cdot \tau_o - \text{наибольшая глубина упругого деформирования;} \\
 & r_{\delta\delta} = 2,52 \cdot 10^{-3} \cdot d_o \cdot \left[\frac{(1 - \mu^2) \cdot \tau_{o-}}{E_y} \right]^{-\frac{4}{3}} - \text{наибольшее значение радиуса вершины} \\
 & \hspace{15em} \text{зерна для пластического деформирования;} \\
 & t_{yn} = \left[\left(\frac{0,8384}{42\pi} \right) \cdot \frac{d_o^3}{r_m} \right]^{\frac{1}{2}} \approx 0,06117 \left[\frac{d_o^3}{r_m} \right]^{\frac{1}{2}} - \text{наибольшая глубина } t_{yn} \text{ пластического} \\
 & \hspace{15em} \text{деформирования, } t_* - \text{начального хрупкого, } t_m - \text{полного хрупкого разрушения} \\
 & t_* = \xi_1^* \left(\left(\frac{\pi \cdot \gamma}{E(1 - \mu^2)} \right) \right)^{\frac{2}{3}} \cdot r^{\frac{1}{3}}; \quad t_m = \xi_2^* \left(\left(\frac{\pi \cdot \gamma}{E(1 - \mu^2)} \right) \right)^{\frac{2}{3}} \cdot r^{\frac{1}{3}}; \quad K_{IC} = \sqrt{\frac{\pi E \gamma}{1 - \mu^2}}, \\
 & \left. \begin{aligned}
 & a_* = 10,12 \left(\frac{K_{IC} r_m}{E} \right)^{\frac{2}{3}}; \quad P_* = 3,412 \cdot 10^4 \left(\frac{K_{IC}^2 r_m}{E} \right); \quad \gamma = 2,3 \cdot 10^{-11} HV^{1,054}; \\
 & r_i = \frac{[\delta + 2(\dot{E}_i + 0,5t)]^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{p}}; \quad p = \frac{\alpha^2 \cdot (\bar{l} + 3\sigma_l)}{12}; \quad f = 0,08 + 0,167 \cdot \sqrt{\frac{2(\dot{E}_i + t)}{r_i}} \\
 & \Delta P_N = K_{IC} (a_*)^{\frac{3}{2}} \left[3804 + 744 \cdot \left(\frac{a_*}{l_o} \right)^{0,5} \right] K_p; \quad T_a = 0,06 \cdot \left(\frac{\Delta P_N}{K_{IC}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \cos \alpha_\delta + t \\
 & \Delta P_{ym} = \Delta P_N \cdot \cos \alpha_\delta; \quad \Delta P_{y*} = P_* \cdot \cos \alpha_\delta; \quad \alpha_\delta = \arctg f; \\
 & \Delta P_y(t) = \Delta P_{y*} - \left[\frac{(\Delta P_{ym} - \Delta P_{y*}) \cdot t}{t_m - t_*} \right] + \left[\frac{\Delta P_{ym} - \Delta P_{y*}}{t_m - t_*} \right] \cdot t_m - \text{сила } \Delta P_y \text{ на} \\
 & \hspace{15em} \text{зерне круга, } \kappa_t - \text{коэффициенты углубления, } \kappa_\xi - \text{развала борозды, } a_* \text{ и } P_* - \\
 & \hspace{15em} \text{радиус начального конуса разрушения и сила, необходимая для этого,} \\
 & \kappa_t = 10,8 \cdot V^{-0,18} \cdot (\bar{r}_m \cdot 10^6)^{0,21} \cdot \left(10 + \frac{E}{E'_o} \right)^{-0,35}; \\
 & \kappa_{\xi\kappa} = 1; \quad \kappa_{\xi j} = 71 \cdot \left[\frac{E(1 - \mu^2)}{10^{10}} - 5,5 \right]^{-0,22}; \quad \kappa_{\xi\gamma} = 147,6 \cdot \left[\frac{E(1 - \mu^2)}{10^{10}} - 4,2 \right]^{-0,25} \\
 & \mathcal{U} \text{ и } r_m - \text{поверхностная энергия и значение текущего радиуса у вершин зерен,} \\
 & p \text{ и } f - \text{полюс эллипсоида и коэффициент трения.}
 \end{aligned}
 \right.
 \end{aligned}$$

Рис. 3. Модель **F** параметров зоны разрушения поверхности заготовок движущимися зернами кругов. Модель **H** глубины T_a трещиноватой зоны.

- Чем тверже (HV) материал хрупких керамических заготовок, тем меньше должна быть скорость его алмазной обработки по причине графитизации режущих алмазных зерен. Низкоскоростное ($V < 3$ м/с) шлифование с большими силами резания ($P_v \leq 1000$ Н) эффективно в сравнении с периферийным ($V > 30$ м/с), так как не приводит к давлениям графитизации ($\sigma_3 = 3$ ГПа при $V = 3$ м/с). При этом производительность круга формы 6А2 выше на 60...65%.
- Расход алмазов на $\sim 15\%$ меньше, а относительная режущая способность ($\text{см}^3/\text{карат}$) кругов (АС6 100/80 М1 – 100) на $\sim 15\%$ больше, чем при шлифовании кругами формы 1А1 и 12А2 заготовок из материала РКК. Шероховатость поверхности при шлифовании кругом 6А2 колец из керамики РКК с $V < 3$ м/с равна 1,84 мкм, глубина трещиноватого слоя $T_a \leq 24$ мкм.

Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование процесса доводки на станке СПШП2 по схеме рис. 4 с целью оценки получаемой плоскостности рабочих торцов у колец – подпятников насосов.

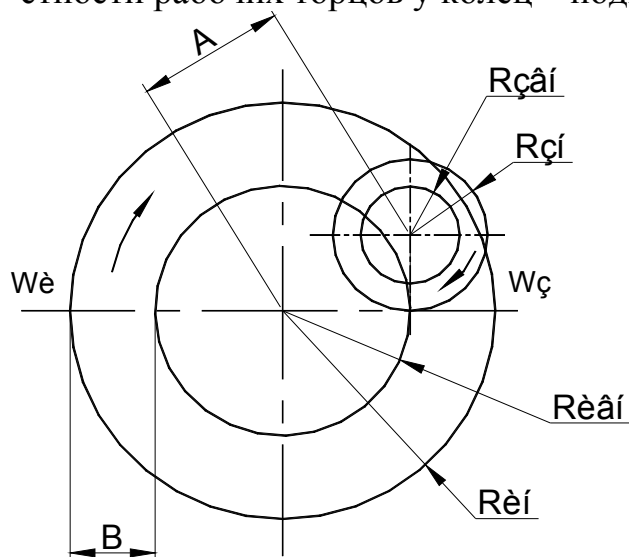


Рис. 4. Схема процесса доводки: $R_{иИ}$, $R_{иВН}$, B , $W_{и}$ – параметры алмазных кругов, $R_{зИ}$, $R_{зВН}$, $W_з$ – параметры заготовки, A – межосевое расстояние.

На основе модели (табл. 1) с помощью языка Паскаль разработана программа вычисления неравномерности $L\% = (L_i - L_{max}) / L_{max}$ пройденного пути любой точкой инструмента (заготовки) по поверхности заготовки (инструмента).

Построены графики – $L_u\%$ и $L_z\%$ в зависимости от параметров обработки ($W_{и}$, $W_з$, A , $R_{иИ}$, $R_{иВН}$, $R_{зИ}$, $R_{зВН}$, B) при постоянных характеристиках инструмента и материала заготовки, давлении. Изучены три вида кинематических схем обработки, получены условия, при которых обеспечивается минимум значений $L_u\%$ и $L_z\%$. Разработана программа вычисления геометрических параметров инструмента для достижения отклонения от плоскостности торца заготовки менее 1 мкм.

Получены следующие результаты:

1. Выпуклая поверхность кольца кругов формы 6А2 обеспечивает плоскую либо незначительно вогнутую (< 1 мкм) поверхность заготовок. Вогнутая поверхность ширины кольца кругов обеспечивает выпуклую поверхность загото-

вок ($\leq \varnothing 60$ мм), причем погрешность формы заготовки равна 0,1...0,37 части погрешности формы круга, вычисляемой по разработанным программам.

Модель оценки отклонения от плоскостности торцов колец.

Таблица 1

Основные формулы	Значения параметров, входящих в основные формулы
<p>1.</p> $L_3 = \frac{4 \cdot A \cdot W_u}{W_3} \cdot \left[1 + \frac{ W_3 \mp W_u \cdot R_3}{A \cdot W_u} \right] \cdot \left \int_{\varphi_0}^{\varphi_\tau} \sqrt{1 - K^2 \cdot \sin^2 \varphi} \cdot d\varphi \right $	$\varphi_0 = \arcsin \sqrt{\frac{R_{u6}^2 - (R_3 \mp A)^2}{4 \cdot R_3 \cdot A}}$ $\varphi_\tau = \arcsin \sqrt{\frac{R_{uH}^2 - (R_3 \mp A)^2}{4 \cdot R_3 \cdot A}}$ $K = 2 \cdot \sqrt{\frac{ W_3 \mp W_u \cdot R_3}{A \cdot W_u}} \bigg/ \left[1 + \frac{ W_3 \mp W_u \cdot R_3}{A \cdot W_u} \right]$
<p>2.</p> $L_u = \frac{4 \cdot A \cdot W_3}{W_u} \cdot \left[1 + \frac{ W_u \mp W_3 \cdot R_u}{A \cdot W_3} \right] \cdot \left \int_{\varphi_0}^{\varphi_\tau} \sqrt{1 - K^2 \cdot \sin^2 \varphi} \cdot d\varphi \right $	$\varphi_0 = \arcsin \sqrt{\frac{R_{36}^2 - (R_u \mp A)^2}{4 \cdot R_u \cdot A}}$ $\varphi_\tau = \arcsin \sqrt{\frac{R_{3H}^2 - (R_u \mp A)^2}{4 \cdot R_u \cdot A}}$ $K = 2 \cdot \sqrt{\frac{ W_u \mp W_3 \cdot R_u}{A \cdot W_3}} \bigg/ \left[1 + \frac{ W_u \mp W_3 \cdot R_u}{A \cdot W_3} \right]$

2. Исследован метод оптимизации геометрии инструмента - ширины его кольца путем численного поиска наименьших значений $L_u\%$ и $L_3\%$, а затем при найденных значениях вычисления наименьших значений радиусов инструмента, при которых обеспечивается отклонение от плоскостности детали ≤ 1 мкм.
3. Расчетные данные расходятся с экспериментальными не более чем на 19 %.

Разработаны математическая модель и алгоритм вычисления показателей $Q_L, Q, P_y, a_{zc}, a_c, N_i S_H$ эффективности технологического процесса шлифования.

Переменные в модели: характеризующие алмазный инструмент - $\varepsilon = 0,5$, $\varepsilon_l = 0,6 - 0,9$, $I_n, W_u, \alpha = b/\bar{l}$ и заготовки: $\mu, \tau_0, E, HV, \alpha_\partial, d_0, \gamma, S_H, R_{max}, R_a$.

Модель построена с учетом ниже следующих условий и ограничений:

- Шероховатые профили шлифованной поверхности заготовок и инструмента эргодичны, стационарны и подчиняются нормальному закону распределения.
- Глубина t внедрения режущего рельефа круга формы 6A2, 12A2 в заготовку разбивается плоскостями, перпендикулярными оси круга, на слои толщиной по 0,1 мкм. В каждом слое подсчитывается число $N_{[\Delta_1, \Delta_2]} \cdot S_H$ режущих вершин зерен (шт.), где S_H - номинальная контактная площадь круга с заготовками,

$N_{[\Delta_1, \Delta_2]}$ – плотность вершин зерен (шт/см²) круга в слое $\Delta_2 - \Delta_1 = 0,1$ мкм [2].

- Основное количество зерен $N_{[\Delta_1, \Delta_2]} \cdot S_n$ круга работает в шероховатом рельефе R_{max} поверхности заготовок.

- Количество режущих вершин зерен в каждом слое толщиной по 0,1 мкм равно $N_{[\Delta_1, \Delta_2]} \cdot S_n \cdot Q(v_z)$ шт, где $Q(v_z) \ll 1$ - относительная опорная поверхность шероховатого слоя на уровнях y, κ, j, γ . Величины $Q(v_\gamma), Q(v_j), Q(v_\epsilon), Q(v_\delta)$ являются вероятностью контакта зерен круга с шероховатыми микро выступами поверхности заготовки в слоях по 0,1 мкм (3).

- Зерна в кругах разрушают материал хрупко, если они внедряются на глубину $t > t^*$ и упруго пластически, если $t < t_{yn}$ и $r_M < r_{xp}$ (рис.3).

- Профиль пластичной борозды глубиной $t \leq t_{yn}$ равен профилю вершины острого среднестатистического зерна круга, а профиль борозды хрупкого разрушения имеет параметры: $b_\kappa = b_m \cdot \kappa_\xi$ и $t_\kappa = t \cdot \kappa_t$.

- Средний объем V_p борозды (удаленного материала) от одного зерна равен произведению средней площади $\left(\frac{2}{3} \cdot \bar{b}_\kappa \cdot a_{z\zeta}\right)$ параболического поперечного сечения борозды со средней глубиной $a_{z\zeta}$ на путь $\bar{L}_\phi = L_T \cdot t_{p\zeta}$ зерна по поверхности заготовки: $V_p = L_T \cdot t_{p\zeta} \left(\frac{2}{3} \cdot \bar{b}_\kappa \cdot a_{z\zeta}\right)$, где $t_{p\zeta}$ - относительный опорный профиль шероховатой поверхности на ζ -ом уровне, L_T - теоретическая длина пути зерна.

- В зависимости от положения вершины зерна в слоях по 0,1 мкм на уровнях y, κ, j, γ внутри шероховатого профиля R_{max} силы ΔP_N и ΔP_y вычисляются по зависимостям $\Delta P_y, \Delta P_{yn}, \Delta P^*, \Delta P_m$ согласно глубинам внедрения t_y, t_{yn}, t^*, t_m (модель F).

- Мгновенное значение силы P_y равно сумме всех сил

$$P_y = \sum_{y=1}^y \Delta P_{y_y} + \sum_{\kappa=1}^{\kappa} \Delta P_{y_\kappa} + \sum_{j=1}^j \Delta P_{y_j} + \sum_{\gamma=1}^{\gamma} \Delta P_{y_\gamma},$$

действующих на вершинах зерен, контактирующих с шероховатым профилем заготовок в слоях по 0,1 мкм в уровнях y, κ, j, γ .

В созданном алгоритме организованы циклы вычислений:

$\gamma = \gamma + 1; j = j + 1; \kappa = \kappa + 1; y = y + 1$, где γ - число слоев по 0,1 мкм хрупкого разрушения, j - квазихрупкого, κ - пластичного, y - упругого деформирования.

Вычислялись параметры:

- плотность вершин зерен (шт./см²) во всех слоях толщиной по 0,1 мкм по заимствованной зависимости [3]:

$$N_{[\Delta_1, \Delta_2]} = N_1(1 - \varepsilon) \cdot [\delta_2 - \delta_1 - (\delta_2 - \bar{l}) \cdot F_1(\delta_2) + (\delta_1 - \bar{l}) \cdot F_1(\delta_1) - \sigma_l^2 \cdot$$

$$\cdot (f_l \cdot (\delta_2) - f_l \cdot (\delta_1)) - \iint_D f(X, Z) \cdot dX \cdot dZ] \quad [3], \quad \text{где} \quad \Delta_2^1 - \Delta_1^1 = 0,1 \text{ мкм}$$

$$X_{IJ} = \left(\frac{\delta_2 - \delta_1}{100} \right) \cdot (J-1) + \delta_1; \quad Z_{IJ} = \left(\frac{1/\alpha - 1}{100} \right) \cdot (I-1) + 1;$$

$$\iint_D f(x, z) \cdot dx \cdot dz = \sum_{I, J=1}^{100} S \cdot f(x_{IJ}, z_{IJ}), \quad \text{ãããã} \quad S = 10^{-4} \cdot (\delta_2 - \delta_1) \cdot \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right);$$

$$f(x_{IJ}, z_{IJ}) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \right) \cdot \sigma_l \cdot \sqrt{1 - \alpha^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{z_{IJ}^2} - \alpha^2} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x_{IJ} \cdot z_{IJ} - \bar{l}}{\sigma_l} \right)^2} \cdot x_{IJ}$$

- относительная опорная поверхность вершин зерен круга в шероховатом профиле заготовки в слоях по 0,1 мкм γ, j, κ, y :

$$Q(v_\gamma) = (1/\sqrt{2\pi}) \cdot e^{-\frac{1}{2}(v_\gamma)^2} - v_\gamma \cdot [1 - \hat{O}(v_\gamma)], \quad \text{где} \quad \Phi(v_\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{v_\gamma} e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt$$

$$v_\gamma = \left| \frac{R_{\max} / \hat{e}_t - 0,1 \cdot (m_\gamma - \gamma) - \sigma_{\delta 1} \cdot \sqrt{2/\pi}}{\sigma_{x1}} \right|; \dots v_\delta = \left| \frac{t_\delta - 0,1 \cdot (m_y - y) - \sigma_{\delta 1} \cdot \sqrt{2/\pi}}{\sigma_{\delta 1}} \right|;$$

- число режущих вершин зерен на площади S_H в слоях γ, j, κ, y :

$$N_\gamma = S_H \cdot N[\Delta_1^0, \Delta_2^0] \cdot Q(v_\gamma); \quad N_j = S_H \cdot N[\Delta_1^j, \Delta_2^j] \cdot Q(v_j); \quad N_\kappa = S_H \cdot N[\Delta_1^\kappa, \Delta_2^\kappa] \cdot Q(v_\kappa);$$

$$N_y = S_H \cdot N[\Delta_1^y, \Delta_2^y] \cdot Q(v_y);$$

- средний объём одной риски от зерен круга в слоях γ, j, κ, y , например:

$$\bar{V}_{p\gamma} = \frac{2}{3} \cdot \kappa_{\xi\gamma} \cdot \left[\frac{\pi \cdot \gamma \cdot r_M^2}{E \cdot (1 - \mu^2)} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot a_{z\gamma} \cdot \bar{V}_u \cdot \left(\frac{2\pi}{W_u} \right) \cdot \kappa_z \cdot t_{p\gamma};$$

- значение толщины a_c , срезаемого слоя за один ход:

$$\hat{a}_{\bar{n}} = [\bar{V}_{p\gamma} \cdot \sum_{\gamma=1}^{\gamma} N_\gamma + \bar{V}_{pj} \cdot \sum_{j=1}^j N_j + \bar{V}_{p\hat{e}} \cdot \sum_{\hat{e}=1}^{\hat{e}} N_{\hat{e}}] \cdot \frac{1}{m \cdot S_1};$$

- линейная Q_L и объёмная Q интенсивность съёма материала:

$$Q_L = a_c \cdot \frac{W_u}{2\pi}; \quad Q = Q \cdot m \cdot S_1.$$

- На основе модели F вычисляли элементарные силы резания на вершинах зерен в слоях γ, j, κ, y :

$$\Delta D_{\acute{o} \acute{o} i \acute{e}} = \cos \alpha \cdot \frac{\pi}{3} \cdot HV \cdot \left[(2t_{\acute{o} i \acute{e}} + r_i) \cdot \sqrt{2r_i \cdot t_{\acute{o} i \acute{e}} + r_i^2} - r_i^2 \right] \cdot (\cos \alpha + f_{\acute{o} i} \cdot \sin \alpha); \quad [4] \quad P_* = 3,412 \cdot 10^4 \left(\frac{K_{IC}^2 r_m}{E} \right),$$

$$\Delta D_{\acute{o} \acute{o}} = 0,1735 \cdot 10^6 \cdot \tau_{i-}^3 \cdot \left[\frac{r_i \cdot (1 - \mu^2)}{A} \right]^2; [4]$$

$$\Delta P_{y*} = P_* \cdot \cos \alpha_{\partial}, \quad \Delta P_N = K_{IC} (a_*)^2 \left[3804 + 744 \cdot \left(\frac{a_*}{l_o} \right)^{0,5} \right] K_p, \quad \Delta P_{ym} = \Delta P_N \cdot \cos \alpha_{\partial} \quad [3].$$

• Параметры - сила P_y и число $N_i S_H$ рабочих зерен круга на площади S_H в глубине, равной t , вычислялись как накопленные суммы в слоях γ, j, κ, y :

$$P_y = \Delta P_y \cdot (t_\gamma) + \Delta P_y \cdot (t_j) + \Delta P_y \cdot (t_\kappa) + \Delta P_y \cdot (t_y);$$

$$P_z = P_y \cdot f; \quad N_i \cdot S_H = S_H \cdot [N_\gamma + N_j + N_\kappa + N_y]$$

Вычисленные по алгоритму значения $Q_l, Q, P_y, a_{zc}, a_c, N_i S_H$ и полученные экспериментально (показаны точками на графиках) приведены на рис. 5. Ошибки указанных выше значений параметров варьируют от 4 до 24%. При шлифовании с силой $P_y = const$ режущая способность кругов (рис.5 а,б) формы 12A2 $Q = f(D1/D2)$ и $Q = f(V)$ имеет экстремальную зависимость, а $Q = f(\tau)$ – монотонную падающую зависимость. Стойкость кругов равна 3...5 мин.

Алгоритм используется для расчета параметров шлифования на этапе проектирования технологий изготовления керамических деталей.

В четвертой главе выполнены экспериментальные исследования процессов шлифования (табл.2) и доводки (табл.3). Получены следующие результаты. Режущие способности кругов Q , вычисленные по эмпирическим формулам 1 и 5 (табл.2) и по приведенному выше алгоритму для одинаковых условий обработки, различаются не более чем на 18% и варьируют от 0,6 до 2,4 см³/мин. Шероховатость при шлифовании по разным технологиям обеспечивается в диапазоне $Ra = 0,4...1,5$ мкм. Глубина трещин $Ta = 5...12$ мкм при скоростной обработке и 25...40 – при низко скоростной. При скоростной доводке притирами режущая способность $Q = 20...100$ мм³/мин, $Rz = 0,05...0,15$ мкм, а кругами формы 6A2 – $Q = 40...80$ мм³/мин, $Ra = 0,02...0,1$ мкм.

В пятой главе представлена методика изготовления деталей формы кольцо из керамики типа РКК. Даны экспериментально апробированные технологические рекомендации.

Методика шлифования и доводки заготовок типа кольцо на станке СПШП 2 с обеспечением $Ra \geq 0,02$ мкм, параллельности торцов $\geq 0,005$ мм, отклонения от плоскостности торцов ≤ 1 мкм содержит нижеследующие действия.

1. Установить по чертежу величины припусков, отклонение от параллельности и плоскостности торцов.

2. Выбрать метод обработки: скоростной кругами формы 12A2 или низко скоростной – 6A2 в зависимости от серийности производства.

3. Вычислить по программе силу резания P_y , глубину трещин Ta (модель F), шероховатость поверхности Ra (Rz) (табл. 2) и режущую способность Q круга. Установить инструмент и вычисленные режимные параметры шлифования.

4. Вычислить значения режущей способности Q доводки, шероховатости Ra (Rz) (табл.3), основное время доводки $T_{дов} = Q_z / Q$ для выбранной зернистости круга формы 6A2, где Q_z – объем припуска на каждой стороне обработки.

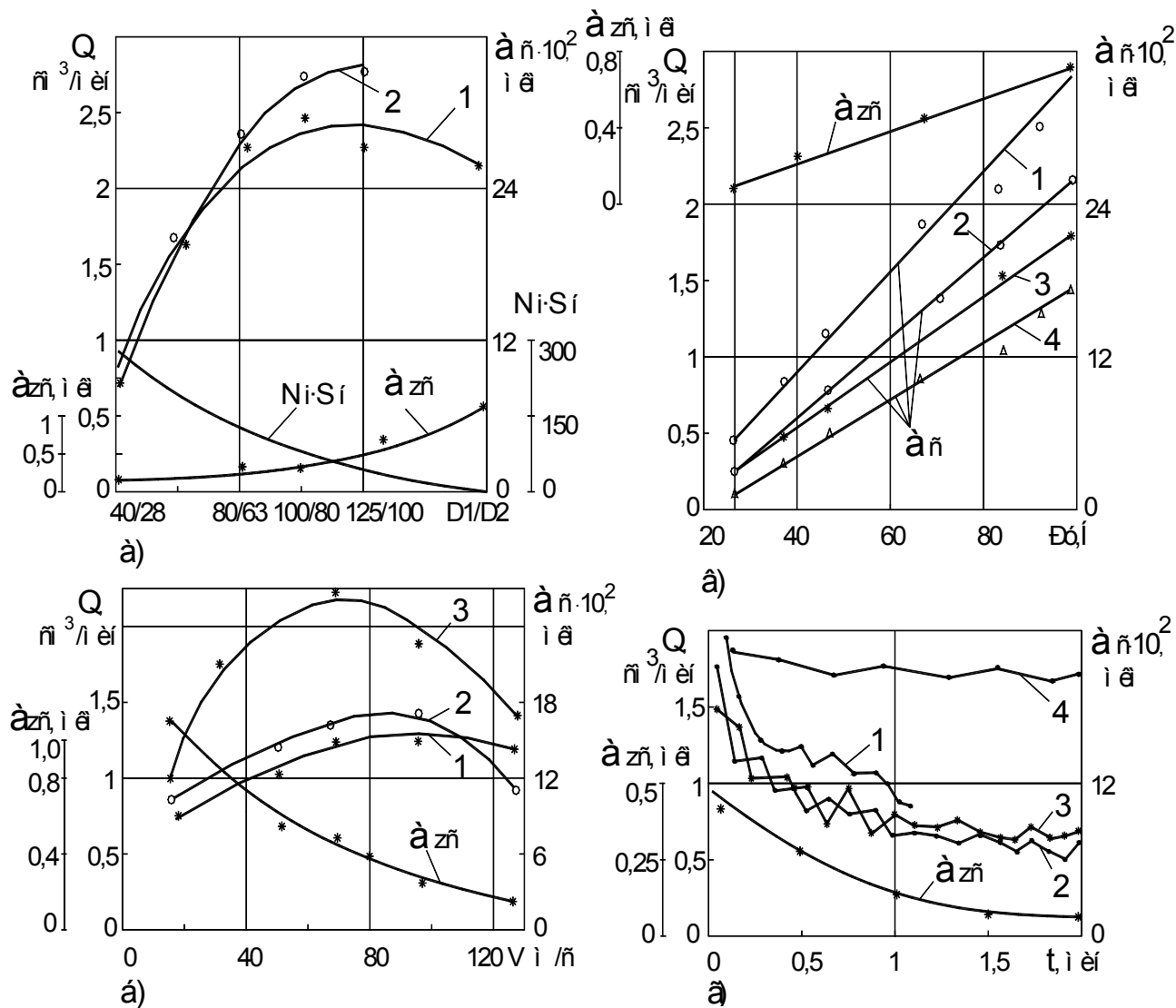


Рис.5. Зависимость параметров Q , a_c , a_{zc} : а) от зернистости $D1/D2$ кругов формы 12A2 ((а - $P_y = 70\text{Н}$, $m \cdot S1 = 282 \text{ см}^2$, $V = 50 \text{ м/с}$ (1), $V = 60 \text{ м/с}$ (2)), б) от скорости шлифования (б - $P_y = 14\text{Н}$ (1), $P_y = 40\text{Н}$ (2), $P_y = 70\text{Н}$ (3), $m \cdot S1 = 216 \text{ см}^2$, круг (80/63)), в) от силы P_y , г) времени шлифования: в) линия 1, 2 - $m \cdot S1 = 141 \text{ см}^2$, 3, 4 - $m \cdot S1 = 282 \text{ см}^2$, $V = 60 \text{ м/с}$, АС6 63/50 МО4-100; г) 1 - $V = 60 \text{ м/с}$, 2 - $V = 90 \text{ м/с}$, 3 - $V = 120 \text{ м/с}$, $m \cdot S1 = 230 \text{ см}^2$, $P_y = 50\text{Н}$, АС6 63/50 МО4-100, 4 - 3 м/с, $S1 = 12,5 \text{ см}^2$, $P_y = 800\text{Н}$, форма 6A2 АС8 100/80 М1-100. Обработывалась керамика РКК при $W_3 = 31,4 \text{ с}^{-1}$, $\tau = 1,7 \text{ мин}$. Примечание: $S'_K = S_K / S_H$.

Таблица 2

Эмпирические зависимости для вычисления параметров шлифования кругами формы 6А2 (формулы 1...4) и 12А2 (формулы 5...8)

№ п/п	Эмпирические формулы
1	$Q = -0,16 - 0,00007 \cdot D_1 + 2,04 \cdot q + 0,0014 \cdot D_1 \cdot q$ $Q = -0,22 + 2,8 \cdot q + 0,007 \cdot V - 0,08 \cdot q \cdot V$
2	$Ra = 1,08 + 0,56 \cdot q - 0,0354 \cdot V - 0,02 \cdot q \cdot V$
3	$T = -3,2 + 70,7 \cdot q + 0,34 \cdot V - 4,62 \cdot q \cdot V$
4	$Ta = 12,2 + 11,95 \cdot q - 0,16 \cdot V - 0,23 \cdot q \cdot V$
5	$Q = \exp. (3,711 - 0,0017 \cdot D_1 + 1,129 \cdot q + 0,003 \cdot V - 0,119 \cdot HV - 0,312 \cdot \tau - 0,0012 \cdot D_1 \cdot q - 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot D_1 \cdot V - 1,9 \cdot 10^{-5} \cdot D_1 \cdot HV - 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot D_1 \cdot \tau + 0,0021 \cdot q \cdot V - 0,014 \cdot q \cdot HV + 0,145 \cdot q \cdot \tau - 7,9 \cdot 10^{-5} \cdot V \cdot HV - 5,4 \cdot 10^{-4} \cdot V \cdot \tau + 0,0019 \cdot HV \cdot \tau)$
6	$T = \exp. (2,487 + 0,0027 \cdot D_1 + 0,524 \cdot q - 0,004 \cdot V - 0,057 \cdot HV + 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot D_1 \cdot P - 0,0074 \cdot q \cdot HV)$
7	$Ra = 0,795 \cdot q^{3,155 - 0,556 \cdot \ln D_1} \cdot D_1^{-0,378 + 0,168 \cdot \ln t} \cdot t^{-0,848 + 0,089 \cdot \ln q}$
8	$Rz = 5,684 \cdot q^{2,413 - 0,442 \cdot \ln D_1} \cdot D_1^{-0,103 + 0,082 \cdot \ln t} \cdot t^{-0,385 + 0,072 \cdot \ln q}$

Таблица 3

Эмпирические зависимости для вычисления параметров доводки притирами (формулы 1 и 2) и кругом формы 6А2 АСМ d1/d2 Б156 – 100 (формулы 3 и 4) предварительно прошлифованных заготовок.

№ п/п	Эмпирические формулы
1	$Q = 0,629 \cdot V^{0,757} \cdot k^{0,445} \cdot HV^{-0,612} \cdot HB^{0,836} \cdot d_1^{0,891} \cdot P^{0,274}$
2	$Rz = \exp (-3,416 + 0,034 \cdot V + 0,048 \cdot k + 0,0265 \cdot HV + 0,008 \cdot HB + 0,006 \cdot d_1 + 0,0205 \cdot P - 0,031 \cdot V \cdot k - 0,00086 \cdot V \cdot HV - 0,0001 \cdot V \cdot HB + 0,0005 \cdot V \cdot d_1 - 0,083 \cdot k \cdot d_1 - 0,049 \cdot k \cdot P + 0,002 \cdot HV \cdot HB - 0,0074 \cdot HV \cdot d_1 + 0,0034 \cdot HB \cdot d_1 + 0,00245 \cdot d_1 \cdot P)$
3	$Q = 8,6 - 101,1 \cdot q - 0,4 \cdot d_1 + 24,1 \cdot q \cdot d_1$
4	$Ra = 0,01 + 0,028 \cdot q + 0,005 \cdot d_1 + 0,0034 \cdot q \cdot d_1$

5. Для обеспечения отклонения от плоскостности ≤ 1 мкм торцов колец по алгоритму (табл. 1) вычислить для размеров заготовки размеры доводочного инструмента станка СПШП 2. Установить инструмент и вычисленные режимные параметры.
6. Сформировать карту технологического процесса с указанием характеристик инструментов, режимов и времени обработки.

Заключение и выводы.

В результате выполненных исследований получены нижеследующие выводы и рекомендации:

1. Установлено, что упруго пластически могут разрушать микрообъем заготовки зерна кругов с радиусами меньше r_{xp} при внедрении в материал на глубину t_{yn} до линии, ограничивающей зону I (рис.2). Во всех остальных случаях деформирование начинается упруго, упруго пластически, квазихрупко и переходит в полное хрупкое разрушение по мере увеличения глубины t внедрения зерна в материал заготовок.
2. Разработаны математическая модель Н (рис. 3) хрупкого разрушения зерном круга микрообъема материала на поверхности заготовки для расчета наибольшей глубины T_a разрушенного поверхностного слоя при торцовом шлифовании керамики, алгоритм и программа ее расчета.
3. Разработана феноменологическая и математическая модель F (рис.1 и 3), включающая геометрические и силовые параметры зоны разрушения на поверхности заготовок движущимися зернами алмазных кругов, алгоритм и программа расчета режущей способности алмазных кругов формы 12A2, 6A2, силы P_u , потребной для осуществления процесса шлифования заготовок.
4. Получены эмпирические зависимости (табл.2 и 3) для расчета технологических параметров Q , T , T_a , Ra , Rz на этапе проектирования технологии шлифования и доводки кругами формы 12A2 и 6A2 заготовок из керамики РКК.
5. Разработана обобщенная математическая модель с общими переменными, включающая поименованные выше модели (рис.3 и табл. 1,2,3), для расчета режимных и геометрических параметров процессов шлифования и доводки с целью обеспечения требуемых показателей качества, формы поверхности и производительности при изготовлении деталей типа кольца.
6. Создана методика изготовления плоских поверхностей на станке СПШП 2 у деталей типа кольцо, обеспечивающая расчет необходимых кинематических, силовых, геометрических параметров процесса и показателей качества деталей на этапе проектирования технологии.
7. Разработана технология мелкосерийного и крупносерийного производства деталей с требованиями к отклонению от плоскостности < 1 мкм и шероховатостью поверхности, соответственно, по критерию $Rz < 1$ и $Ra \geq 0,02$ мкм. Применено, соответственно, скоростное многоступенчатое шлифование и доводка заготовок ($\Phi \times \phi = (25 \dots 250) \times (15 \dots 230)$ мм) на сменном столе – спутнике станка

СПШП 2 или низко скоростное штучное шлифование и доводка заготовок с использованием крупно и мелко зернистых кругов формы 6А2.

8. Полученные результаты применены при изготовлении подпятников, торцевых уплотнений различных насосов и в газовых сетях.

9. Создан опытный экземпляр станка типа СШП 2 и внедрен в производство.

10. Ожидаемый экономический эффект от внедрения технологий шлифования и доводки кругами формы 6А2 равен 650 тыс. руб / год .

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. Ковеленов Н. Ю., Колодяжный А. Ю., Никитков Н. В. Анализ и сопоставление эффективности плоского шлифования твердой ($HV > 30$ ГПа) керамики алмазными кругами разной формы // *Металлообработка*. - 2003. - № 2. - С. 2-7.

2. Ковеленов Н. Ю., Колодяжный А. Ю., Никитков Н. В. Трециноватый поверхностный слой при шлифовании высоко прочных керамик // *Металлообработка*. - 2003. - № 3. - С. 2-7.

3. Ковеленов Н. Ю., Колодяжный А. Ю., Никитков Н. В. Обеспечение качества поверхности плоских керамических заготовок методами алмазной доводки. // *Металлообработка*. - 2003. - № 5. - С. 1-7.

4. Никитков Н. В., Н. Ю. Ковеленов, А. Ю. Колодяжный. Сопоставление качества поверхности плоских керамических заготовок, полученного методами алмазной доводки // В сб.: *Качество поверхностного слоя деталей машин (КПС-2003): Материалы международной научно-практической конференции 24-26 июня 2003г.* - СПб.: ПИМаш, 2003. - С. 123-129.

5. Ковеленов Н. Ю., Колодяжный А. Ю., Никитков Н. В. Проблемы производства точных деталей из конструкционной керамики. // *Научно-технические ведомости СПбГПУ.* – СПб.: СПбГПУ, - 2003. - № 4. - С. 87-90.

6. Колодяжный А. Ю.. Перспективы производства деталей из конструкционной керамики. // В сб.: *Молодежь Поволжья – науке будущего ЗМНТК-2003: Материалы молодежной научно-технической конференции 2003г.* – Ульяновск: УГТУ, 2003. – С. 52-53.

7. Колодяжный А.Ю., Вылкост Л.В., Никитков Н.В. Повышение эффективности закрепления керамических заготовок за счет использования шестигулачкового патрона. // В кн.: *XXXI неделя науки СПбГПУ. Ч III: Материалы межвузовской научной конференции 25-30 ноября 2002 г.* - СПб.: СПбГПУ. – 2003. - 116 с.

8. Колодяжный А.Ю. Ковеленов Н. Ю. Исследование новой схемы шлифования плоскостей керамических заготовок. // В кн.: *XXXI неделя науки СПбГПУ. Ч III: Материалы межвузовской научной конференции 25-30 ноября 2002 г.* - СПб.: СПбГПУ. – 2003. - 117 с.

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать .2004. Объем в п.л. 1,0
Тираж 100. Заказ № XX

Отпечатано с готового оригинал – макета, предоставленного автором,
в типографии Издательства СПбГПУ
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29