

УДК: 621.923

DOI 10.21661/r-559447

*Дин Кай Цзянь*

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ  
И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ  
ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОПЕРАЦИЯХ ДОВОДКИ  
ФИКСИРОВАННЫМ АБРАЗИВОМ**

*Аннотация:* изложены теоретические и экспериментальные результаты исследования процессов доводки керамики фиксированным абразивом. Представлены уравнения интенсивности диспергирования, позволяющие оценить производительность и точность формообразования с использованием соответствующей технологической среды и геометрии поверхности притира.

*Ключевые слова:* керамика, доводка, прочность, скорость, съемка, качество.

*Ding Kai Jian*

**MANAGING THE QUALITY OF FUNCTIONAL SURFACES  
AND THE PROCESSING PERFORMANCE PRODUCTS OF THE CERAMIC  
MATERIALS ON THE POLISHING OPERATIONS OF FIXED ABRASIVE**

*Abstract:* the theoretical and experimental results of the investigation of fixed abrasive polishing of ceramic are presented in the paper. The equations of the intensity of dispersion allowing to assess the performance and the accuracy of shaping by using related technological environment and the geometry of the lapping are given in the article.

*Keywords:* ceramics, polishing, strength, speed, quality.

Постановка задачи.

Керамические материалы могут обладать практически неограниченными сочетаниями свойств и функциональных характеристик. Показатели качества в процессах доводки с направленным формированием качества поверхности обеспечиваются: управлением процессом диспергирования на операциях финишной

алмазной обработки; созданием технологических сред прогнозируемого воздействия на обрабатываемый материал.

Многочисленные исследования показывают [1], что в технологии производства изделий из керамики доминирует явление наследования свойств. Так, например, неравномерная микроструктура ухудшает физико-механические характеристики изделия, шероховатость поверхности и делает нестабильными показатели качества. Наряду с высокими прочностными свойствами керамические материалы обладают низкой трещиностойкостью и низкой воспроизводимостью. Свойств поверхности, трудны в обработке. Таким образом, их потенциально высокие функциональные показатели свойств не реализуются в полном объеме.

Типовая схема технологического процесса прецизионной обработки изделий из керамических материалов состоит из операций: алмазное шлифование (черновое и чистовое) – алмазная доводка – полирование, в том числе физико-химическое [2]. Ниже представлено экспериментальное исследование технологических особенностей формирования качества изделий из керамики ВК–100, содержащей 99.8%  $Al_2O_3$  на операциях доводки фиксированным абразивом.

Концепция работы базируется на результатах фундаментальных и экспериментальных исследований.

1. *Физики процессов диспергирования*, проведенных В.П. Алехиным [5], В.К. Старковым [7], Ю.Д. Филатовым и В.В. Роговым [2].

2. *Трибологии резания*, проведенных Ф.Я. Якубоковым [6], и др.

3. *Процессов алмазной обработки керамики*, выполненных В.А. Хрульковым [9], П.Н. Орловым [4].

4. *Теории технологического наследования*, систематизированного А.С. Васильевым, А.М. Дальским [3] и другими исследователями.

Современные представления о механизме процесса диспергирования на операциях доводки поверхностей из хрупких материалов основаны на комбинированном воздействии режущих зерен (механическое взаимодействие) и жидкой фазы абразивной среды (физико-химическое взаимодействие). Основная

особенность процесса – отсутствие жесткой кинематической связи между элементами технологической среды: заготовка – притир – абразивная среда.

При этом процесс характеризуется следующими явлениями.

1. Кумулятивным механо- и физико- химическими воздействием технологической среды.
2. Изменением физико-химических характеристик рабочей среды вследствие накопления шлама, процессов структуризации среды и др.
3. Воздействием абразивной среды на поверхностные слои обрабатываемой заготовки и притира в виде циклических динамических нагрузок в условиях всестороннего сжатия, приводящих к накоплению усталостных повреждений и изменению физического состояния.
4. Разрушением деформируемого микрообъема обрабатываемого материала.

С течением времени в системе диспергирования напряжение возникает в каждом элементе поверхностного объема, изменяя его физическое состояние независимо от исходной структуры и дефектов; при этом поверхностный слой переходит в активированное неравновесное состояние. В результате энергетических изменений в поверхностных слоях образуется новая неравновесная структура, которая становится объектом разрушения.

Для того чтобы отразить тот факт, что разрушение представляет собой кинетический процесс, в уравнение диспергирования должна входить не величина повреждаемости, а скорость  $d\omega/dt$ , мкм /мин:

$$d\omega/dt = F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \dots) \quad (1)$$

Многоточие в (1) означает, что  $F$  является не только функцией одних главных напряжений, но и всего комплекса технологических условий. Конкретизация этой функции представляет собой очень сложную задачу. Поэтому в теории разрушения часто оказываются от детального изучения распространения микротрещин, а используют теорию накопления повреждений, феноменологически описывающую процессы разрушения.

В соответствии с современной траекторкой иерархии управления производственными процессами машиностроения технологическую среду необходимо

рассматривать как среду уровня машиностроительного производства, среду уровня технологического процесса и среду уровня технологической операции (по А.С. Васильеву [3]). Наличие функциональной зависимости скорости диспергирования позволяет прогнозировать интегральный уровень выходных показателей процесса, например скорость съема припуска, и появляется возможность оперативного управления технологическим процессом.

### *Результаты исследования*

В экспериментальной части работы исследованы зависимости показателей качества изделия от различных факторов технологической среды процессов доводки. проведено исследование влияния механической обработки на показатели прочности  $[\sigma_{\text{и}}]$  изделия при изгибе. Установлено существенное влияние дефектов поверхности на показатели прочности изделий из керамики.

Экспериментальные и расчетные значения средней прочности на изгиб для глиноземистой керамики различной шероховатости приведены в таблице. В зависимости от уровня показателей качества поверхности установлено уменьшение предела прочности от 5 до 25%.

Результаты испытаний пластинок из керамики  
на изгиб  $(\bar{\sigma}_{\text{и}} \pm S)$ , МПа

Схема испытания	Положение пластинки	Кол- во, шт.	Предел прочности		%
			$\bar{\sigma}_{\text{и}}$	$S$	
Осесимметричное нагружение	Полировка сверху	25	210	18	70
	Полировка снизу	18	230	10	77
	Полировка с двух сторон	18	250	10	93
Трехточечный изгиб	Полировка снизу	18	270	14	90
	Полировка с двух сторон	14	300	16	100

Рис. 1

На рис.2 изображены графики зависимости расчетной прочности керамики из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  без учета влияния обработки дефектов (кривая 1) и с учетом (кривая 2). При низкой пористости керамики до 5% (т.е. при небольших дефектах структуры)

относительная погрешность  $\varepsilon(\sigma)$  при оценке прочности образцов без учета дефектов обработки может достигать 30%. Экспериментально установлено влияние СОТС, применяемых в технологии механической обработки керамики (рис. 3), на показатели прочности.

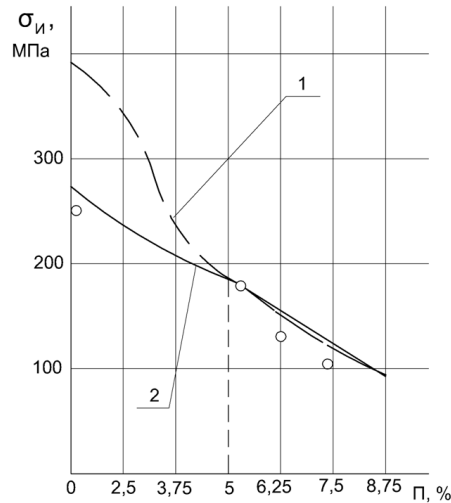


Рис. 2. Влияния пористости  $\Pi$  (%) на прочность при изгибе  $\sigma_n$  образцов из конструкционной керамики ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ): 1 – без учета поверхностных дефектов; 2 – с учетом поверхностных дефектов.

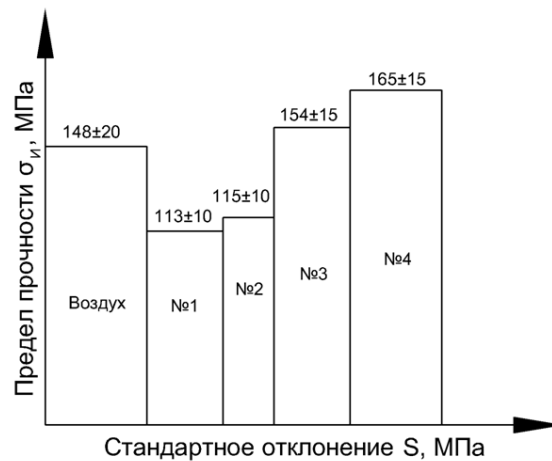


Рис. 3. Гистограмма влияния технологической среды на прочности керамики ВК100: №1 – водный раствор кальцинированной соды (2%); №2 – водный раствор масла касторового сульфированного (1%); №3 – керосин; №4 – масляная комбинированная СОТС.

При равенстве размеров дефектов обработки и структурных дефектов первые практически не оказывают влияния на прочностные свойства образцов из керамики. Из условий формирования дефектов структуры и механической обработки можно считать, что плотность вероятности распределения структурных и обработочных дефектов не зависят друг от друга.

Основной задачей финишных операций для изделий машиностроения по ГОСТ 2789-06 является формирование показателей шероховатости, глубины нарушенного поверхностного слоя ( $R_z$ ,  $R_a$ ,  $t_p$ ,  $R_{\max}$ ).

Регулирование показателей качества поверхностного слоя позволит уменьшить влияние механической обработки на эксплуатационные показатели изделий из керамики за счет снижения размера максимального дефекта обработки.

Исходными данными анализа технологического наследования являются экспериментальные результаты исследования технологических особенностей формирования показателей качества при обработке керамики ВК-100 методами доводки связанным и свободным абразивом и шлифованием.

Динамика изменения показателей качества в последовательности операций обработки определялась исходя из концепции технологического наследования свойств и механизмов наследования, сформулированных в [3] с использованием искусственных нейросетей.

В результате исследования установлены следующие значения весовых коэффициентов наследования для технологических условий различного уровня взаимодействия по параметрам шероховатости, согласно [3]:

- $\Delta K_T \rightarrow 80\%$  – технологические условия уровня операции доводки;
- $\Delta K_y \rightarrow 15\%$  – условия уровня технологического процесса;
- $\Delta K_I \rightarrow 5\%$  – коэффициент наследования технологических условий.

Для описания интенсивности удаления припуска в процессах формования поверхностей при доводке фиксированным абразивом предложена зависимость скорости диспергирования как функции термосиловых условий нагружения, физических характеристик контакта и свойств технологической среды вида

$$I_M = I_0 \exp\left(-\frac{\Delta U}{kT}\right);$$

$$I_M = \frac{BK_c^2}{V_c HV^2} \exp\left(-\frac{U - \gamma^* K_c}{kT}\right), \quad (2)$$

где  $I_M$  – скорость съема, кг/с;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $g = 9.81$  м/с<sup>2</sup>;  $B = 2gA_F\rho$  – жесткость – критерий упругопластического контакта, Н/м;  $A_F$  – фактическая площадь контакта, м<sup>2</sup>;  $K$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $K_c$  – коэффициент интенсивности напряжений, МПа м<sup>1/2</sup>;  $HV$  – твердость материала по Виккерсу, К;  $V_c$  – скорость скольжения, м/с;  $U$  – внутренняя энергия,  $\Delta U$  – энергия активации деформируемого объема, Дж.

Уравнение (2) учитывает все основные факторы, влияющие на процесс абразивного разрушения при доводке связанным абразивом. Микрошероховатость поверхности контакта и упругопластические свойства зоны контакта учитываются фактической площадью контакта. Энергетическое состояние структуры учитывается микротвердостью, вязкостью разрушения и структурно – чувствительным коэффициентом, а режимы контактного взаимодействия – скоростью скольжения, температурой процесса и контактными нагрузками.

Предлагаемый подход основан на взаимосвязи между физическими процессами деформирования и разрушения, происходящими на микроуровне, и макроскопическом поведении материала. Он позволяет, с одной стороны, дистанцироваться от излишней детализации дислокационных и других структурных процессов, сопровождающих хрупкое разрушение материала поверхностного слоя, а с другой – сформулировать критерий разрушения локального объема в терминах механики сплошной среды. Энергетическая концепция хрупкого разрушения Гриффитса-Орована рассматривает прямую связь вязкости разрушения  $K_{IC}$  с поверхностной энергией [4], которая для плоского напряженного состояния имеет

вид:  $K_{IC} = \sqrt{2E\gamma_m}$ , где  $\gamma_m$  – поверхностная энергия разрушения, Дж/м<sup>2</sup>.

На рис. 4 изображены экспериментальные результаты, реализующие технологические условия доводки связанным абразивом: круг 1А2, АС16 63/50, используемая СОТС – 1% -й раствор масла касторового сульфированного (МКС) в воде. Установлены статистические зависимости связи «физико-механические свойства – показатели эффективности обработки» [4].

В качестве переменных факторов использованы связки различного содержания: Б1, Б156, БР, МО4, обладающие различными упругими свойствами. Изображены зависимости производительности  $I_M$  и параметра шероховатости поверхности  $R_a$  от упругих свойств связки круга на операции доводки связанным абразивом. Наиболее эффективной из рассмотренных является связка МО4, обладающая максимальными теплофизическими характеристиками из рассмотренных выше типов связок.

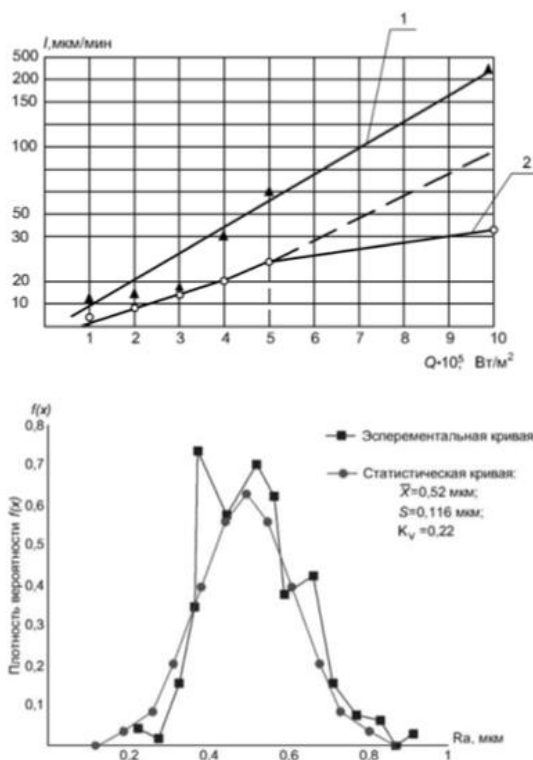


Рис.4. Влияния мощности механического воздействия  $Q$ , Вт/м²: а – на скорость абразивного диспергирования: 1 – связка МО4; 2 – связка Б1; б – на характер распределения параметра шероховатости  $R_a$ , мкм.



Таким образом, влияние технологической среды в процессе диспергирования на операции доводки необходимо оценивать по характеру взаимодействия среды и поверхности. Эффективность среды обусловлена физическими характеристиками среды и энергией ее взаимодействия с материалом поверхности [2]:

$$F_T = (\theta_1, \theta_2, \sigma_{\Pi}, \eta) = \left[ \sigma_{\Pi} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) - 2V_0 \eta \right] \frac{\operatorname{tg} \theta_2}{\sigma_{\Pi}}, [\text{Дж/м}^2]^2 \quad (3)$$

Где  $\sigma_{\Pi}$ ,  $\eta$  – поверхностное натяжение и вязкость технологической среды, соответственно;  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  – углы смачивания поверхности инструмента и заготовки, соответственно;  $V_0$  – скорость относительного скольжения, м/с.

Таким образом, математическая связь  $F_T \rightarrow \gamma_m^2 \rightarrow (K_c)^4$  является выражением взаимодействия технологической среды и поверхности в условиях конкретной операции. В [2] установлено, что функция взаимодействия  $F_T(\theta_1, \theta_2, \sigma_{\Pi}, \eta) \rightarrow \max$ .

Получены зависимости параметра шероховатости поверхности  $R_{\max}$  от параметров технологической среды:

$$R_{\max} = \frac{P}{K_c^* \operatorname{tg} \gamma_K} \cdot \sqrt{A_F Z}, \quad (4)$$

Где  $P$  – давление прижима, Мпа;  $\gamma_K$  – кинематический передний угол;  $K_c$  – экспериментальный коэффициент интенсивности напряжений, МПа  $\text{м}^{1/2}$ ;  $A_F$  – фактическая площадь контакта,  $\text{м}^2$ ;  $Z$  – зернистость инструмента, м.

### Вывод

1. Установлены связи и уровень технологического наследования выходных параметров процесса алмазного формообразования поверхности из керамических материалов методами доводки с условиями взаимодействия технологической среды и поверхности. Наибольший вклад в интегральный коэффициент наследования в процессе формирования микрогеометрических параметров качества вносит коэффициент наследования условий технологической операции  $\Delta K_T$ , составляющий 80%.

2. Предложены функциональные зависимости интенсивности диспергирования на операциях алмазной доводки керамических материалов, учитывающие технологические факторы и структурно-энергетические изменения поверхностных слоев материала, позволяющие оперативно реагировать на изменение условий диспергирования. В качестве информативного критерия взаимодействия среды и поверхности рекомендуется величина экспериментальной вязкости разрушения  $K_c$  материала.

3. Использование аппарата искусственных нейросетей позволяет статистически учитывать множество наследственных факторов взаимодействия среды и поверхности. Предложена методика оценки энергетического потенциала среды с учетом физических характеристик взаимодействия среды в поверхности с использованием гибридной искусственной нейросети с динамически изменяющейся конфигурацией.

### *Список литературы*

1. Волосова М.А. Технология комбинированного поверхностного упрочнения режущего инструмента из оксидно-карбидной керамики / М.А. Волосова // Вестник машиностроения. – 2005. – №9. – С. 32–36.

2. Боровский В.Г. Разработка технологии нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент на основе минералокерамики и кубического нитрида бора / В.Г. Боровский // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2003. – №3. – С 5–6.

3. Васильев А.С. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А.С. Васильев; под ред. А.И. Кондакова. – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.

4. Орлов П.Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки / П.Н. Орлов. – М: Машиностроение, 1974.

---

**Дин Кай Цзянь** – канд. техн. наук, профессор, Технологический университет Китая, Китайская Народная Республика.

**Ding Kai Jian** – Candidate of Technical Sciences, Professor, Technological University of China. People's Republic of China.