

УДК 621.923

**В. В. Гусев** д-р техн. наук, проф., **А. Д. Молчанов** к.т.н., доцент  
**Д. А. Моисеев**, аспирант  
Донецкий национальный технический университет  
Тел./Факс: +38 (062) 3010807; E-mail: [msmo@fimm.donntu.org](mailto:msmo@fimm.donntu.org)

## **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ НА УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД АЛМАЗА**

*В статье приведен анализ изменения параметров рабочей поверхности алмазного шлифовально-го круга при обработке технической керамики. Износ алмазных зерен носит преимущественно абразивный характер, что косвенно подтверждается линейной зависимостью интенсивности износа от твердости обрабатываемого материала. Экспериментально установлено, что удельный расход алмаза определяется средними сечениями среза обрабатываемого материала на алмазных зернах. При средних сечениях среза менее критического значения удельный расход алмаза зависит от производительности обработки керамики.*

**Ключевые слова:** керамика, алмазный круг, алмазное шлифование керамики, удельный расход алмаза.

**V. V. Gusev, A. D. Molchanov, D. A. Moiseev**

### **INFLUENCE OF MECHANICAL PROCESSING MODES AND PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF TECHNICAL CERAMICS ON THE SPECIFIC CONSUMPTION OF DIAMONDS**

*The article provides an analysis of the change in the parameters of the working surface of a diamond grinding wheel when processing technical ceramics. Debris of diamond grains is predominantly abrasive, which is indirectly confirmed by the linear dependence of the intensity of wear from the hardness of the material being processed. It is experimentally established that the specific consumption of diamond is determined by the average sections of the cutting material of the material being treated on diamond beans. With the middle sections of the slice of less critical value, the specific flow rate of the diamond linearly depends on the performance of the processing of ceramics.*

**Keywords:** ceramics, diamond wheel, diamond grinding of ceramics, specific consumption of the diamond.

**Введение.** Все шире в различных областях техники применяются детали из технической керамики (ТК). Основными требованиями, предъявляемыми на стадии производства к этим деталям, является обеспечение требований по точности обработки и качеству поверхностного слоя керамические детали для высоконагруженных конструкций авиационного и космического назначения, газотурбинных двигателей, обтекатели антенн, автомобильных двигателей, режущего инструмента, деталей металлургического производства, работающих в условиях воздействия на них интенсивных тепловых и силовых нагрузок. Они вызывают в керамических деталях сложное неравномерное напряженно-деформированное состояние. Хрупкий характер разрушения керамических материалов заставляет обращать основное внимание не на прочность химической связи, которая весьма высока, а на величину, количество и распределение микротрещин, возникающих как на стадии получения заготовки, так и при механической обработке. Необходимо, чтобы уровень напряжений в процессе эксплуатации был ниже прочности материала при заданном уровне вероятности разрушения [1,2]. При этом конструктор, как правило, не оговаривает требования к структуре дефектного слоя керамики, который оказывает непосредственное влияние на прочность детали.

Алмазное шлифование является наиболее эффективным способом съема материала припуска в керамических заготовках вследствие их высокой твердости. Выходные

показатели технологической системы операции алмазного шлифования технической керамики – точность, качество обработанной поверхности, энергоемкость, производительность, расход инструмента определяется характеристикой инструмента и изменением состояния его рабочей поверхности в процессе обработки. По мере удаления материала припуска происходит изменение состояния режущей поверхности круга. С увеличением удаляемого кругом объема материала припуска растет сила резания, что может привести к появлению брака при изготовлении деталей из керамики вследствие скалывания краев и растрескивания пластин из керамики [3], увеличению глубины и структуры трещиноватого слоя, влияющих на эксплуатационную прочность изделий [4]. Выбор рациональных условий алмазного шлифования невозможен без анализа изменения состояния РПК во времени [5,6].

Обычно в качестве набора параметров, которые подлежат назначению технологом при обработке и условно считающиеся непрерывными, принимают режимы резания. В основе выбора параметров процесса обработки лежат знания о физической природе протекающих при резании явлений и их влиянии на формирование поверхностного слоя изделий из керамики. Необходимо иметь набор зависимостей между параметрами, подлежащими определению, и параметрами качества поверхностного слоя изделий из керамики. Однако технолог не всегда учитывает изменения, происходящие в рабочей поверхности алмазного шлифовального круга при обработке керамики.

Поэтому разработка методики выбора технологических условий обработки с учетом требований по вероятности безотказной работы по прочности изделия и требованиям по высотным параметрам микрорельефа поверхностного слоя деталей из керамики с учетом изменяющейся характеристики рабочей поверхности круга (РПК) является актуальной.

**Цель** настоящей работы является выявление закономерностей изменения состояния РПК в процессе работы на основе функционирования технологической системы алмазного шлифования керамики, влияния режима обработки на удельный расход алмаза.

**Экспериментальное определение характеристик рабочей поверхности круга и силы резания.** Для проведения исследований по определению сил резания, оценки состояния рабочей поверхности алмазных кругов при шлифовании образцов из конструкционной керамики был создан исследовательский стенд на базе заточного станка модели 3672. Обрабатываемый материал ситалл АС-370 ( $K_{1c}=2,1 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$ ,  $HV=8 \text{ ГПа}$ ), ситалл АС-418 ( $K_{1c}=1,7 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$ ,  $HV=7,8 \text{ ГПа}$ ), оксидная горячепрессованная керамика  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Гп) ( $K_{1c}=4,2 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$ ,  $HV=14,9 \text{ ГПа}$ ).

Линейный износ круга  $\Delta L(\tau)$  измеряли с помощью специального стационарного приспособления [7] в шести фиксированных точках по периферии и в трех точках вдоль образующей круга с точностью  $\pm 0,001 \text{ мм}$ . Удельный расход алмаза  $q$  (в  $\text{мг}/\text{см}^3$ ) инструмента определяли согласно ГОСТ 16181-82 и методики, приведенной в работе [5]. Максимальный вылет зерен из связки  $\Delta R$  (мкм) определяли по профилограммам, которые определяли непосредственно на станке. Определение числа зерен на рабочей поверхности круга  $n_z(\tau)$  находили в соответствии с методом стереологической реконструкции поверхности [8] круга по профилограммам. Из профилограмм также определяли по результатам профилографирования круга расстояние между вершинами зерен и плотность распределения вершин зерен по высоте рабочей поверхности алмазного круга  $u$ , которая оценивалось распределением Вейбулла

$$f(u) = \frac{\delta}{\lambda} \cdot u^{\delta-1} \cdot \exp\left(-\frac{u}{\lambda}\right), \quad (1)$$

где  $\delta$  и  $\lambda$  - параметры распределения ( $\delta > 0$ ,  $\lambda > 0$ ).

Составляющие силы резания при шлифовании регистрировались через усилитель 8АНЧ-7М (погрешность 5%) самописцем НЗ38 – 4П (погрешность 4%). Перед проведением исследований систему измерений тарировали. Статическую тарировку проводили с помощью динамометра ДОСМ-0,5. Было установлено отсутствие взаимовлияния при измерении составляющих силы резания. Совокупная погрешность системы измерения составляющих силы резания, определенная вероятностным способом, не превышает 14,5%. Чувствительность измерения горизонтальной составляющей силы резания составила 0,25 Н/мм, а вертикальной – 0,5 Н/мм. СОТС – вода с добавкой 0,3% кальцинированной соды (расход – 5л/мин).

Перед проведением исследований круг правился электроэрозионным методом с контролем исходного состояния круга методом профилографирования. При проведении исследований в каждой экспериментальной точке число повторных измерений было не менее трех. С целью устранения влияния ширины образцов на полученные результаты для сопоставления обрабатываемости различных видов керамики силы резания приводились к единице ширины образца, т.е. определялись погонные значения сил резания при плоском врезном шлифовании периферией круга.

**Результаты экспериментальных исследований.** При обработке керамики и ситаллов с увеличением удаленного материала припуска силы резания возрастают. На основе экспериментальных данных была получена зависимость изменения нормальной составляющей силы резания от объема удаленного материала при алмазном плоском продольном врезном шлифовании керамики кругом единичной ширины (рис. 1а) с учетом их физико-механических свойств можно записать

$$F_{ny} = A \left( \frac{k_{\phi} \cdot K_{1c}^4}{HV^3} \right)^{1.18} \cdot (b - \exp(-cQ)) \cdot V_d^{0,34} \cdot V_k^{-0,41} \cdot t^{0,79}, \quad (2)$$

где  $k_{\phi}$  - постоянный коэффициент, зависящий от формы зерна (параметров индентора [9]);  $Q$  – объем удаленного материала, в  $\text{см}^3$ , отнесенный к единице ширины круга, в  $\text{см}^3$ ,  $V_d, V_k, t$  – режимы резания;  $A, b, c$  – постоянные коэффициенты учитывающие изменение состояние РПК и определяемые экспериментально.

При шлифовании хрупких материалов большое значение имеет направление действия результирующей составляющей силы резания. Величиной, характеризующей угол наклона результирующей силы резания к обрабатываемой поверхности, является коэффициент абразивного резания [5], который определяется отношением  $K_a = F_d / F_f$ . Уменьшение коэффициента абразивного резания при неизменной производительности приводит к относительному росту нормальной составляющей силы резания, что приводит к увеличению дефектов в поверхностном слое детали [10]. Как было установлено экспериментально, коэффициент абразивного резания зависит от значения критической силы, при индентировании которой образуются медианные трещины  $K_a \sim \left( \frac{k_{\phi} \cdot K_{1c}^4}{HV^3} \right)^{0,12} \cdot f(V_d, V_k, t, \text{характеристика ШК})$ . При обработке керамики, имеющей большие характеристики по прочности, коэффициент абразивного резания выше. Ко-

эффицент абразивного резания от объема удаленного материала (рис. 1, б) может уменьшаться по экспоненциальной зависимости  $K_a = K_{aи} + a * \exp(-d * Q)$ , (где  $K_{aи}$  – исходная режущая способность,  $a, d$  – постоянные коэффициенты, учитывающие обрабатываемый материал, состояние РПК и определяемые экспериментально) или не меняться при обработке. Характер и величина изменения абразивного резания определяется характеристикой круга, методом и условиями управления режущей способностью круга, режимом обработки.

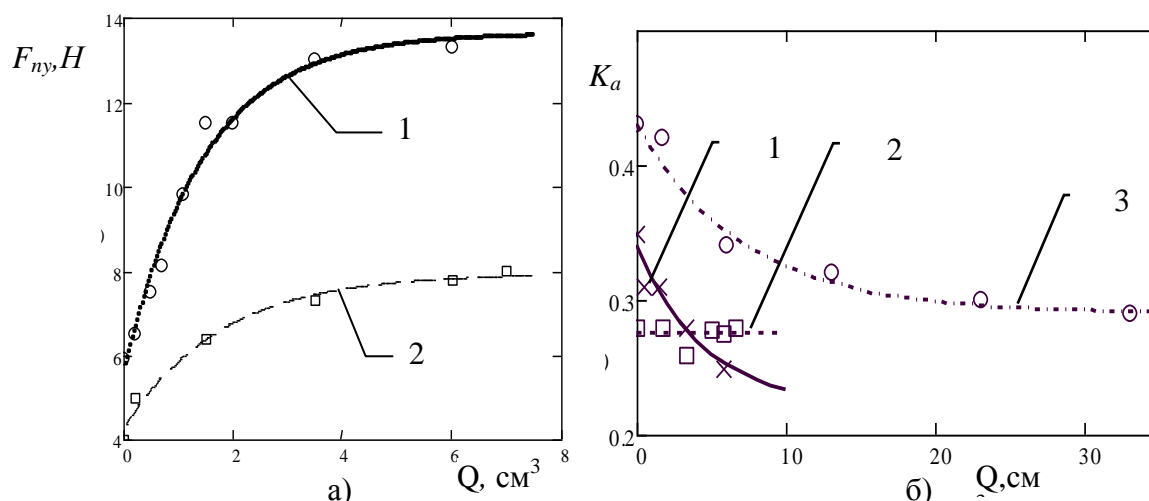


Рисунок 1. Влияние объема удаленного материала припуска керамики на нормальную составляющую силы резания (а) и коэффициент абразивного резания  $K_a$  (б) при обработке керамики: 1 –  $Al_2O_3$  (Гп) 2 - ситалла АС-370 кругом единичной ширины 1А1 250х20х32 АС6-4-М2-01-125/100 при плоском врезном шлифовании периферией круга с режимами резания:  $V_k=24$ м/с;  $V=6$ м/мин;  $t=0,1$ мм 3 - ситалл АС-370 кругом единичной ширины 1А1 200х6х76 АС32-4-М2-01-250/200 при плоском врезном шлифовании периферией круга с режимами резания:  $V_k=33$ м/с;  $V=6$ м/мин;  $t=1,3$ мм

По мере удаления материала припуска происходит изменение состояния рабочей поверхности ШК. В результате различных видов износа происходит изменение параметров плотности распределения Вейбулла характеризующих разновысотность зерен на рабочей поверхности круга (рис. 2). Плотность распределение алмазных зерен по высоте, с увеличением объема снимаемого припуска при обработке ситалла, изменяется от нормального ( $\delta=2,05$ ;  $\sigma(\delta)=0,05$  и  $\lambda=1450$ ;  $\sigma(\lambda)=100$ ), к левосторонней асимметрии ( $\delta=1,58$ ;  $\sigma(\delta)=0,01$  и  $\lambda=84$ ;  $\sigma(\lambda)=10$ ). С износом ШК уменьшается высота рабочего слоя ( $\Delta R$ ) с 75мкм до 35 мкм, а среднее число алмазных зерен на единице рабочей ( $n_3$ ) поверхности – с 21шт./мм<sup>2</sup> до 17 шт./мм<sup>2</sup> ( $\sigma(n_3)=1,5$ ). При обработке более твердого материала ( $Al_2O_3$  (Гп)) изменения на РПК происходят значительно быстрее, по сравнению со шлифованием ситалла АС-370 (см. рис. 2).

Результаты расчета, в соответствии с методикой работы [11], показали, что число активных зерен по мере увеличения объема удаленного материала возрастает примерно на 20%. Это связано с изменением характера распределения вершин зерен на рабочей поверхности круга. При этом средние сечения среза на зерне уменьшаются 40%. Последнее обстоятельство наряду с образованием площадок износа приводит к увеличению сил резания при шлифовании хрупких неметаллических материалов.

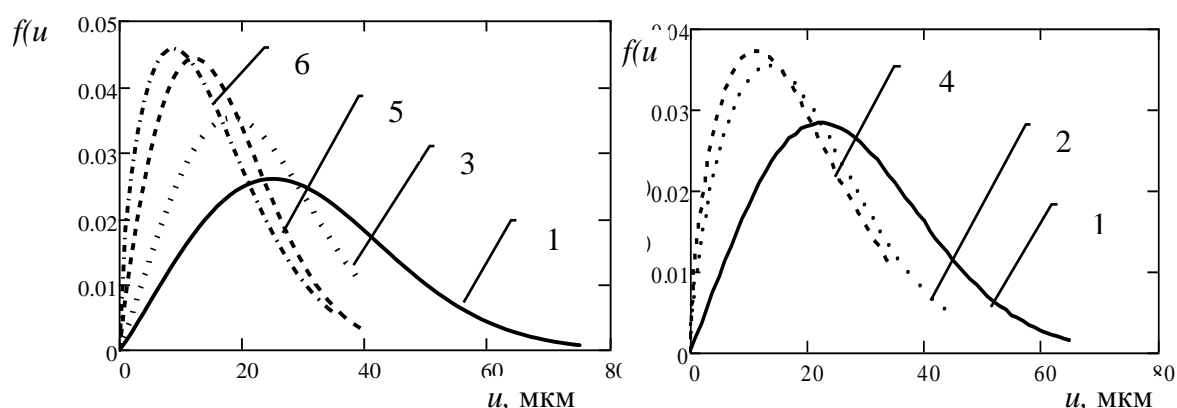


Рисунок 2. Влияние объема удаленного материала припуска керамики на плотность распределения вершин зерен  $f(u)$  по высоте рабочей поверхности алмазного круга при обработке керамики ситалла AC-370 (а) и  $Al_2O_3$ (Гп) (б) - кругом единичной ширины 1A1 250x20x32 AC6-4-M2-01-125/100 при плоском врезном шлифовании периферией круга с режимами резания:  $V_k=24$ м/с;  $V=6$ м/мин;  $t=0,1$ мм после удаления: 1 – в исходном состоянии круга, после электроэрозионной правки; 2 –  $0,2 \text{ см}^3/\text{мм}$ ; 3 –  $1,5 \text{ см}^3/\text{мм}$ ; 4 –  $2,2 \text{ см}^3/\text{мм}$ ; 5 –  $5 \text{ см}^3/\text{мм}$ ; 6 –  $6,6 \text{ см}^3/\text{мм}$

Интенсивность линейного износа круга зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала. Так для ситалла AC-370 (рис. 3 а) она составляет  $21,1 \text{ м}^3/\text{м}$ , а для  $Al_2O_3$  (Гп) –  $38,7 \text{ м}^3/\text{м}$ . Интенсивность линейного износа для  $Al_2O_3$  (Гп) выше, чем у AC-370 во столько раз (1,84 раза), во сколько раз микротвердость  $Al_2O_3$  (Гп) выше, чем у ситалла AC-370 (в 1,86 раз). Это может являться косвенным подтверждением преобладающего абразивного характера износа алмазного круга. С увеличением прочности и зернистости алмаза в шлифовальном круге его линейный износ при обработке ситалла AC-370 (см. рис. 3а) снижается. Это приводит к тому, что удельный расход алмаза при обработке керамики (рис. 3, б) также определяется твердостью обрабатываемого материала и характеристикой алмазного инструмента.

Для определения влияния скорости шлифовального круга  $V_k$  и нормальной составляющей относительного движения рабочей поверхности инструмента и удаляемого материала заготовки  $W$  (определяемая глубиной продольной подачи и скоростью заготовки) [12] на удельный расход алмаза при обработке ситалла AC-418 был использован ортогональный центральный композиционный план второго порядка. Уровни и интервалы варьирования факторов приведены в таблице 1. Число повторов в каждой факторной точке было принято равным трем.

Результаты экспериментальных исследований удельного расхода алмаза приведены в таблице 2. После обработки экспериментальных результатов была получена эмпирическая зависимость удельного расхода алмаза ( $\text{мг}/\text{см}^3$ ) при шлифовании ситалла

$$q = 2,7 * 10^8 V_k^{2,5 \ln V_k - 14,27} W^{0,6 \ln W - 1,7 \ln V_k + 3,6} \tag{3}$$

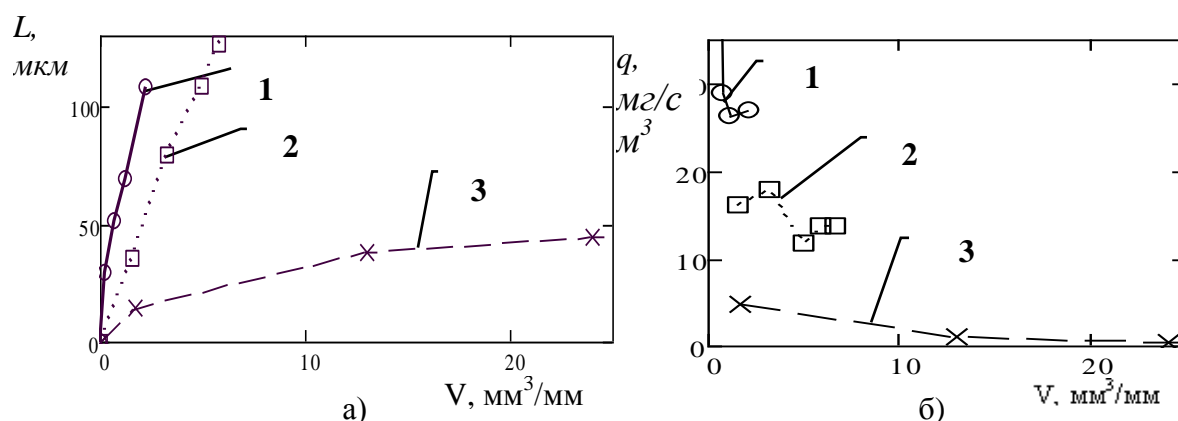


Рисунок 3. Влияние объема удаленного материала припуска керамики на линейный износ круга и удельный расход алмаза (б) при обработке керамики: 1 –  $Al_2O_3$  (Гп) 2 - ситалла АС-370 кругом единичной ширины 1А1 250x20x32 АС6-4-М2-01-125/100 при плоском врезном шлифовании периферией круга с режимами резания:  $V_k=24$ м/с;  $V=6$ м/мин;  $t=0,1$ мм 3 - ситалл АС-370 кругом единичной ширины 1А1 200x6x76 АС32-4-М2-01-250/200 при плоском врезном шлифовании периферией круга с режимами резания:  $V_k=33$ м/с;  $V=6$ м/мин;  $t=1,3$ мм

Таблица 1. Уровни варьируемых факторов и интервалы варьирования

Уровни факторов	Обозначения	$V_k, м/с$		$W * 10^{-3}, м/с$	
		$X_1$	$\ln X_1$	$X_2$	$\ln X_2$
Верхний	+1	53	3,9703	29	3,3673
Нижний	-1	33	3,4965	7,8	2,0541
Основной	0	43		18,4	
Интервал варьирования		10		10,6	

Таблица 2. Результаты удельного расхода алмаза при обработке ситалла АС-418

№	$X_1$	$X_2$	$q, мг/см^3$	$lg q$	$S_q^2$	$q_{расч}$
1	+1	+1	0,194	-1,640	0,0025	0,196
2	-1	+1	0,440	-0,821	0,0006	0,368
3	+1	-1	0,123	-2,096	0,0001	0,171
4	-1	-1	0,113	-2,180	0,0001	0,112
5	+1	0	0,178	-1,726	0,0001	0,148
6	-1	0	0,211	-1,556	0,0004	0,193
7	0	+1	0,189	-1,737	0,0014	0,225
8	0	-1	0,112	-2,189	0,0003	0,123
9	0	0	0,128	-2,056	0,0004	0,145

С увеличением скорости шлифования удельный расход алмаза уменьшается, а с ростом нормальной составляющей относительного движения инструмента и заготовки

он возрастает. Для анализа влияния средних сечений среза на удельный расход алмаза используем приведенную в работе [11] методику расчета средних сечений среза обрабатываемого материала на алмазном зерне вдоль дуги контакта в зависимости от режимов резания.

Результаты зависимости удельного расхода алмаза при шлифовании керамики представлены на рисунке 4. Экспериментальные значения на рисунке обозначены крестиками. Зависимость удельного расхода алмаза от величины средних значений среза обрабатываемого материала на алмазном зерне имеет нелинейный характер. Аппроксимация экспериментальных значений показала возможность описать экспериментальные точки двумя сопряженными линиями. Прямолинейным участком при средних се-

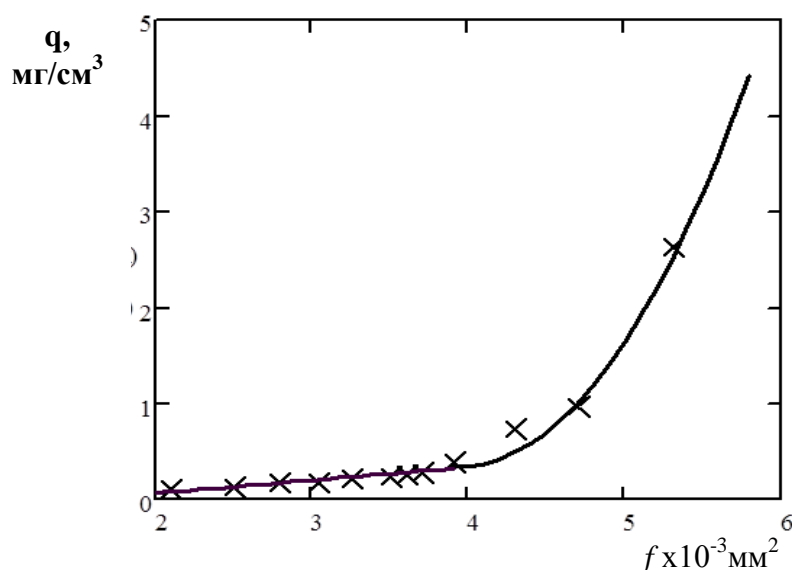


Рисунок 4. Величина удельного расхода алмаза  $q$  в  $\text{мг/см}^3$  в зависимости от средних значений сечений среза на зерне круга IAI 200x20x32 AI-315/250-4-M2-01 при обработке ситалла AC-418

чениях среза обрабатываемого материала на алмазном зерне менее  $4 \times 10^3 \text{мм}^2$  и параболическим участком при больших значениях. Это свидетельствует о действии преимущественно разных механизмов разрушения алмазных зерен при обработке ситалла с различными значениями средних сечений среза обрабатываемого материала на алмазном зерне. При небольших значениях средних сечений среза обрабатываемого материала износ круга происходит в результате преимущественно абразивного износа вершин на алмазном зерне с последующим их усталостным разрушением (рис. 5а). На микрофотографии отчетливо видны бороздки, появившиеся в результате такого механизма воздействия материала на разогретую поверхность площадок износа. На площадках износа возникают значительные нормальные напряжения, которые вызывают растрескивание поверхностных слоев алмаза с образованием своеобразной мозаики. На поверхности зерна также виден износ с явно выраженными сколами части алмазного зерна. При увеличении средних сечений среза обрабатываемого материала преимущественным механизмом разрушения становится разрушение зерен сколом (рис. 5б) или их вырыв из связки круга.

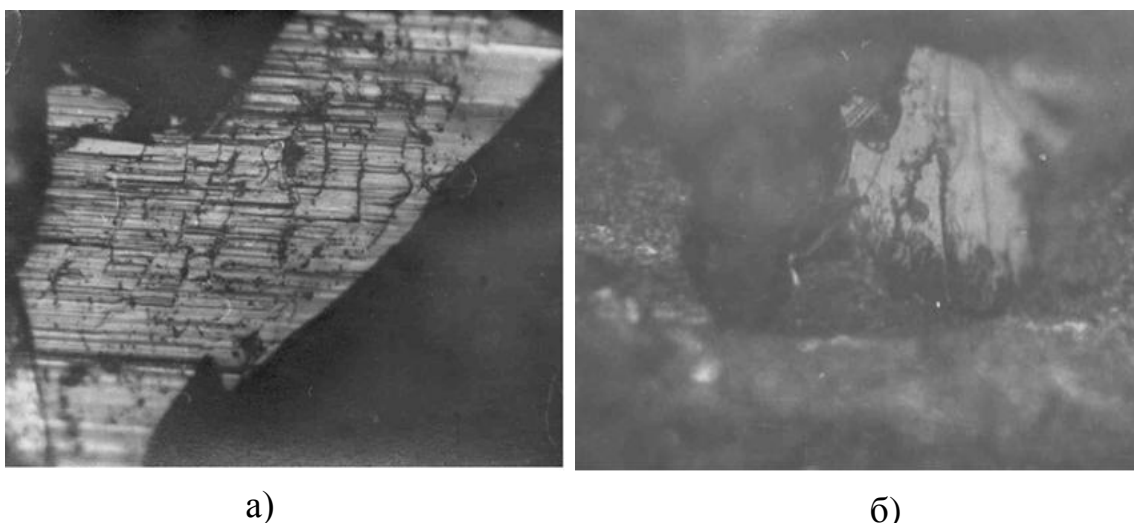


Рисунок 5. Алмазные зерна круга 1А1 200х32х10х3 А-315/250 – 4 – М2-01 после шлифования ситалла АС-418 с режимами резания: а)  $V_k=33\text{ м/с}$ ;  $t=0,5\text{ мм}$ ;  $V_d=0,1\text{ м/с}$ : - увеличение в 500 раз; б) –  $V_k=53\text{ м/с}$ ,  $V_d=0,3\text{ м/с}$ ,  $t=0,5\text{ мм}$ ; увеличение 200 раз

Таким образом, удельный расход алмазов при обработке керамики зависит от условия работы алмазных зерен при удалении материала припуска, определяемого средними сечениями среза обрабатываемого материала, приходящееся на единичное зерно. При сечениях среза превышающих критическое значение механизм износа меняется от преимущественно абразивного износа вершин на алмазном зерне с последующим их усталостным разрушением к разрушению зерен сколом или их даже полному удалению из связки круга. Для уменьшения удельного расхода алмаза при обработке керамики необходимо выбирать режимы обработки таким образом, чтобы средние сечения среза обрабатываемого материала, приходящееся на единичное зерно не превышали критических значений.

### Выводы

Рабочая поверхность круга в процессе удаления материала припуска претерпевает изменения, что, в свою очередь, оказывает влияние на условия формирования поверхностного слоя детали, которые отличаются от первоначальных.

Экспериментально установлено, что износ алмазного круга при обработке технической керамики носит преимущественно абразивный характер. Интенсивность линейного износа круга и связки прямо пропорциональна твердости обрабатываемого материала.

Удельный расход алмаза при шлифовании керамики зависит от средних сечений среза ОМ на алмазных зернах. При средних сечениях среза менее критического значения расхода алмаза от режимов резания изменяется линейно от производительности обработки. При более интенсивной обработке (сечениях среза превышают критическое значение) происходит резкое увеличение расхода алмаза и круг переходит в режим катастрофического износа.

Выбор режимов обработки технической керамики с учетом надежности эксплуатации изделий должен определяться с учетом изменений, происходящих на РПК при его износе. Он должен осуществляться с учетом величины средних сечений среза обра-



батываемого материала на алмазных зернах, а сила резания должна быть меньше допустимых значений при формировании дефектного слоя не менее чем в два раза.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Суздальцев, Е. И. Радиопрозрачные, высокотермостойкие материалы XXI века [Текст] / Е.И. Суздальцев // Огнеупоры и техническая керамика. – 2002. – №3. – С.42-50.
2. Гусев, В. В. Исследование напряженно-деформированного состояния в керамических соплах гидросбива окалины и влияние на их прочность структурных и обработочных дефектов [Текст] / В. В. Гусев, Е. А. Лукашевич, В. А. Фомченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2005. – №18. – С. 157–164.
3. Скоростная алмазная обработка деталей из технической керамики [Текст] / Н. В. Никитков, В. Б. Рабинович, В. Н. Суботин, Н. Н. Шепилов. Под. ред. З. И. Кремня. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1984. – 131с.
4. Витвицкий, П. М. Прочность и критерии хрупкого разрушения стохастически дефектных тел [Текст] / П. М. Витвицкий, С. Ю. Пожена – Киев : Наукова думка, 1980. – 187с.
5. Попов, С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов [Текст] / С. А.Попов, Н. П.Малевский, Л. М. Терещенко. – М.: Машиностроение,1977. – 263с.
6. Федорович, В. А. Динамика изменения параметров рабочей поверхности круга при шлифовании СТПМ // Резание и инструмент в технологических системах - Харьков: ХГПУ, 2000. – №56 – С.154-163.
7. Гусев, В. В. Определение параметров разновысотности зерен алмазного круга при шлифовании / В. В. Гусев, А. Д. Молчанов // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. Труды 5-й международной научно-технической конференции, 28-29 мая 2002. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2002 – С.175-179.
8. Гусев, В. В. Оценка состояния рабочей поверхности алмазного шлифовального круга с помощью профилографирования [Текст] / В. В. Гусев, Д. А. Моисеев // Международный сборник научных трудов Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – № 4(59)' – С.11–17.
9. Морозов Е. М., Зернин М. В. Контактные задачи механики разрушения. [Текст] – М.: Машиностроение, 1999. – 544с.
10. Гусев, В. В. Силы резания и формирование дефектного слоя при алмазном шлифовании керамики [Текст] / В. В. Гусев // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2003. – №13. – С. 70–76.
11. Гусев, В. В. О распределении параметров срезов при глубинном круглом шлифовании периферией круга [Текст] / В. В. Гусев // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – Вып.65. – С.37–46.
12. Абразивная и алмазная обработка материалов [Текст]: Справочник / под ред. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391с.

Поступила в редколлегию 15.04.2021 г.