

УДК 621.923

**В. В. Гусев**, д-р техн. наук, проф., **Д. А. Моисеев**, аспирант  
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
Тел./Факс: +38 (062) 3010807; E-mail: [mc@mech.dgtu.donetsk.ua](mailto:mc@mech.dgtu.donetsk.ua)

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

*В статье рассмотрен вопрос оценки состояния рабочей поверхности алмазного шлифовального круга при обработке керамики. Предложено описывать профиль зерен алмазного шлифовального круга с учетом площадок износа на них на основании результатов профилографирования рабочей поверхности круга. Состояние рабочей поверхности круга можно оценить с помощью скалярной характеристики - относительной опорной длины профиля зерен на определенном расстоянии от наружной поверхности.*

**Ключевые слова:** керамика, алмазный круг, рабочая поверхность круга, профилографирование, стереологическая реконструкция поверхности.

**V. V. Gusev, D. A. Moiseenco**

## ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF WORKING SURFACE OF DIAMOND GRINDING WHEEL

*In article the question of an assessment of a condition of a working surface of a diamond grinding wheel when processing ceramics is considered. It is offered to describe a profile of grains of a diamond grinding wheel taking into account platforms of wear on them on the basis of results of a profilografirovaniya of a working surface of a wheel. The condition of a working surface of a wheel can be estimated by means of the scalar characteristic - the relative basic length of a profile of grains at a certain distance from an external surface.*

**Keywords:** ceramics, diamond wheel, working surface of a wheel, profilografirovaniye, stereological reconstruction of a surface.

**Введение.** Профилографирование рабочей поверхности круга (РПК) отличается от других методов исследования простотой и большим объемом получаемой информации, но имеет систематическую погрешность, вызванную тем, что ошупывающий наконечник при своем прямолинейном перемещении не попадает на вершины большинства режущих кромок, а проходит по их боковым сторонам. На кафедре мехатронные системы машиностроительного оборудования ДонНТУ было разработано специальное устройство (рис.1) для записи режущего профиля алмазного круга на металлической связке с выделением зерен из общего рельефа круга[1]. Оно построено на базе профилограф-профилометра 4, электронного блока 3 и приспособления 2. Информация выводится на ленту самопишущего прибора профилограф-профилометра 5.

На приспособлении 2 располагается датчик профилограф-профилометра, который регистрирует колебания коромысла с лопаточкой, которое, перемещающегося в соответствии с изменением профиля круга. Здесь же располагается привод вращения круга, состоящий из малооборотного двигателя, блока редукции и приводного капролонового ролика. При помощи пониженной редукции достигается очень малая частота вращения алмазного круга – 1 оборот за 10 часов для круга диаметром 200 мм, соответствующая линейной скорости перемещения, равной 1 мм/мин. Такая скорость трассировки круга соответствует скоростям протяжки датчика, применяемым при профилографировании поверхности детали.

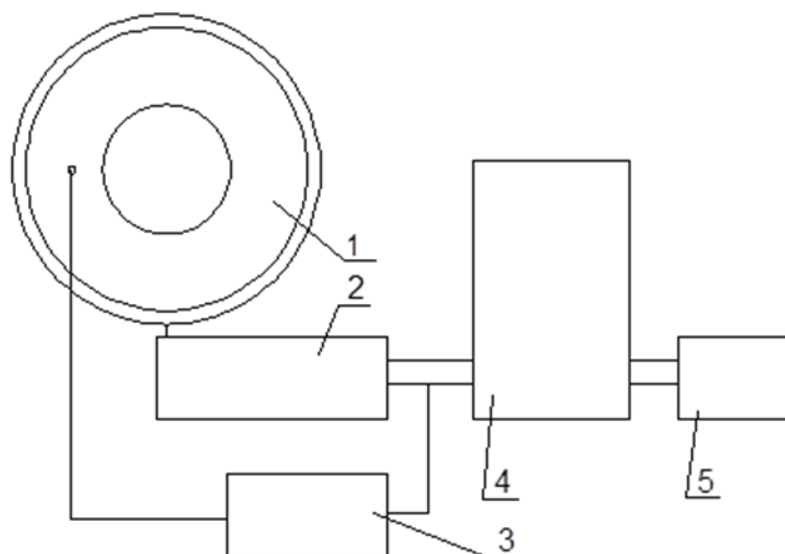


Рисунок 1. Структурная схема для записи режущего профиля алмазного круга с выделением зерен из связки: 1- алмазный круг, 2 - приспособление для перемещения записывающей иглы и вращения круга, 3- устройство для выделения зерен из профиля, 4 – профилограф-профилометр, 5 – записывающий прибор

**2. Основное содержание и результаты работы.** Перед записью профиля РПК производилась тарировка всего измерительного устройства. Для этого использовалась микрометрическая скоба с ценой деления 2 мкм. Длина профилограммы составляет не менее 15-20 мм рабочей поверхности круга. Привод вращения круга имеет возможность смещения в вертикальном направлении, что позволяет его использовать для различных размеров алмазных кругов. В качестве контактирующего элемента применяется лопаточка, выполненная из закаленной стали. Толщина ее составляет 0,05 мм, а ширина варьировалась в пределах от 0,1 до 0,7 мм в зависимости от зернистости круга и задач исследований. Запись алмазных зерен воспроизводит изображение набора частиц, находящихся в пересекаемой плоскости щупа, в искаженном виде, как это показано на рис.2. Профилограмма поверхности круга является плоскостью ортогональных проекций всех элементов структуры, содержащихся в объеме, отсекаемом краями щупа. Анализ получаемого рельефа круга по профилограмме требует применения методов стереологической реконструкции поверхности, которая аналогична анализу структуры фольги при электронной микроскопии [2].

При профилографировании лопаточкой с выделением связки за счет ее токопроводности происходит то же, что и при исследовании тонкой фольги или тонкого среза поля непрозрачных элементов в прозрачной среде. Две параллельные плоские секущие, лежащие на расстоянии  $\Delta$  друг от друга, проходят сквозь структуру. Структуру рабочей поверхности круга можно представить как бы состоящей из непрозрачных зерен в прозрачной среде. При этом на профилограмме наблюдаются вертикальные проекции частей зерен, лежащих между плоскостями, проходящими через края щупа (см. рис.2).

Плоскость наблюдения воспроизводит изображение набора зерен, находящихся в пересекаемой плоскости в искаженном виде. Большие зерна закрывают меньшие и их изображения могут перекрываться. Число изображений на проекции  $N_A$  не будет равно истинному числу зерен вследствие эффекта экранирования и отсутствия сечений тех

зерен, которые пересекаются краями щупа. Эффект экранирования проявляется при  $\Delta/\bar{d}_3 > 1$ , где  $\bar{d}_3$  – средний диаметр зерна. Так как при 100% концентрации алмазов объем, занимаемый ими, составляет 0,25, то для определения истинного числа зерен используем метод Хиллиарда [2]. Определение числа зерен в единице объема  $N_V$  не требует поправок на экранировку и пересечение и заключается в экстраполяции  $N_A(\Delta)$  к нулевой толщине  $\Delta$  слоя (лопатки). Определяют  $N_{ди}$  и  $\bar{H}$  (средняя ширина зерен) для нескольких толщин лопаточки и строят график в координатах  $\ln(N_A + \Delta \cdot \bar{H}) - \Delta$  и на оси ординат при  $\Delta=0$  находят  $\ln N_A$ .

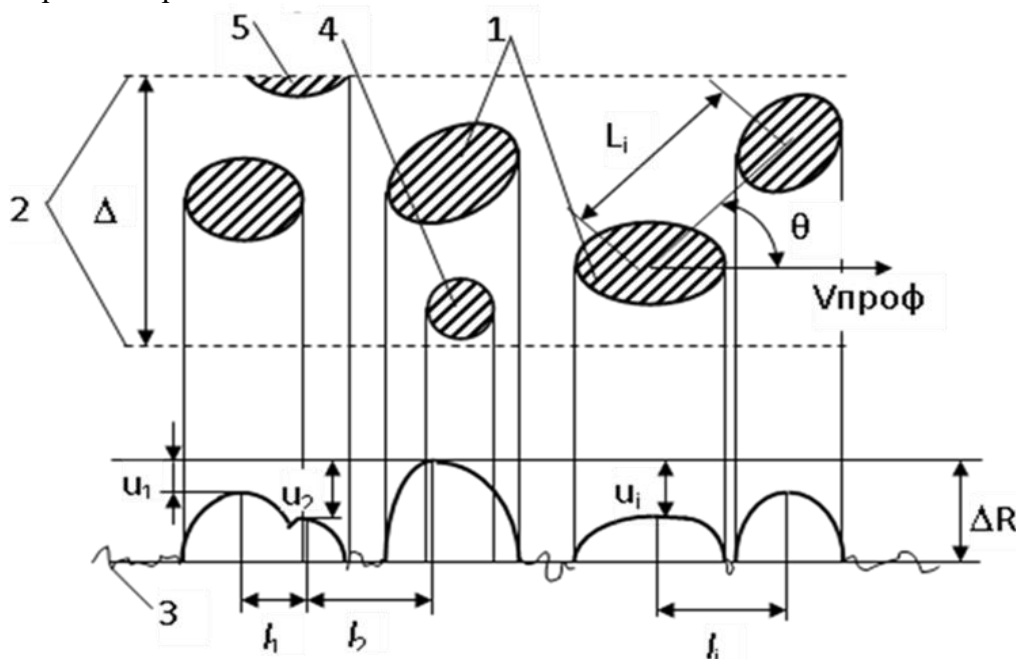


Рисунок 2. Схема профилографирования алмазного круга: 1 – зерно, 2 - границы профилографирования ( $\Delta$  – ширина иглы), 3 – связка круга, 4 – экранируемое зерно

Проекционное изображение элементов структуры круга при профилографировании (см. рис. 2) требует, как и в случае определения истинного числа зерен на поверхности по измерению расстояния между вершинами зерен  $l_3$  на профилограмме, определить ее истинное значение  $L_3$ . Для случая, когда вершины зерен в зоне профилографирования и направление между двумя ближайшими вершинами (задаваемое углом  $\theta$ ) распределены равномерно, можно воспользоваться при определении истинного расстояния между вершинами зерен зависимостью  $L_3 = 4 \cdot l_3 / \pi$ , предложенной в работе [3]. При этом ширина лопаточки  $\Delta$  при профилографировании должна находиться в пределах  $\bar{d}_3 \leq \Delta \leq 2\bar{d}_3$ , где  $\bar{d}_3$  – средний диаметр алмазных зерен. В противном случае происходит экранирование одних зерен другими и искажение в определении истинного расстояния между вершинами зерен.

При изучении формы поперечного среза наиболее часто [4] используют универсальное выражение, описывающее изменение ширины зерна ( $b_3$ ) от его высоты

$$b_3 = C_b \cdot u^{m_3}, \quad (1)$$

где  $C_b$  и  $m_3$  – эмпирические коэффициенты,  $u$  – координата, отсчитываемая от вершины алмазного зерна.

Были проведены исследования профиля зерен круга 1A1 250x20x76 AC6 125/100 – 4 – M2-01 после правки электроэрозионным методом и удаления 22 см<sup>3</sup> ситалла на единицу ширины круга. После обсчета записанного профиля зерна осуществлялся переход от эквидистанты к реальному профилю с учетом радиуса закругления щупа. При экспериментах использовался щуп шириной 0,1 и 0,5 мм. Результаты обработки профилограмм зерен (на глубину до 10 мкм) показали, что показатель степени  $m$  имел значение  $0,5 \pm 0,02$  независимо от состояния круга и ширины щупа. Коэффициент  $C_b$  принимал значения от 8 до 16. При коэффициенте  $C_b=14$  значение ширины зерна совпадает с размерами эллипса, описывающего зерно средних размеров для принятой зернистости и ориентированного вдоль большей его полуоси ( $b_3=53,8$ ) [5]. При  $C_b=8$  результаты совпадают с экспериментальными значениями (в случае моделирования зерна конусом с шаровым сегментом у вершины) Лукина Л.Н. [6].

При работе шлифовального круга на поверхности алмазных зерен образуется площадка износа рис.3. В связи наличием у профиля зерна площадки износа при вершине шириной  $l_3$ , действительный профиль зерна следует аппроксимировать системой из 2 уравнений:

$$\begin{cases} b_3 = F(l_3), \text{ при } u = 0; \\ b_3 = C_b \cdot u^{m_3}, \text{ при } u > 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $F(l_3)$  – функция распределения длин площадок износа на зерне.

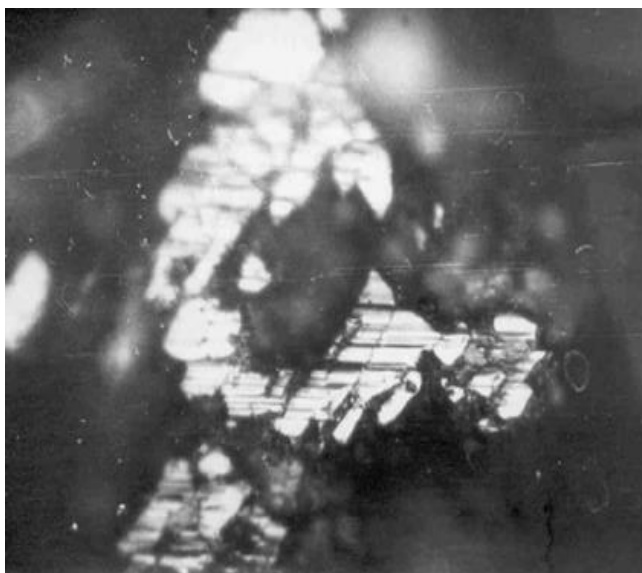


Рисунок 3. Площадка износа на алмажном зерне круга (x500) 1A1 250x20x76 AC6 125/100–4–M2-01 при плоском шлифовании ситалла AC-418 с продольной подачей  $V_d=6$  м/с,  $V_k=33$  м/с;  $t=0,4$  мм  
а) алмазное зерно увеличение в 200 раз;  
б) площадка износа x500 раз

Количество зерен с такой площадкой износа на зерне составляет до 70% от общего числа зерен. Как показал анализ профилограмм, ширина этой площадки является величиной переменной и изменяется от 5 до 70 мкм для исследуемой зернистости круга. Распределение площадок износа по размерам приведено на рис.4. Статистическая обработка распределения длин площадок износа показала, что распределение длин площадок износа на алмазных зернах адекватно (в соответствии с критерием  $\chi^2$ ) описывается одним из следующих законов: Вейбулла, экспоненциальным или гамма распределениями. Доля зерен с площадками износа у наружной поверхности РПК возрастает. После правки на рабочей поверхности круга остаются зерна с площадкой

износа, однако их количество сокращается.

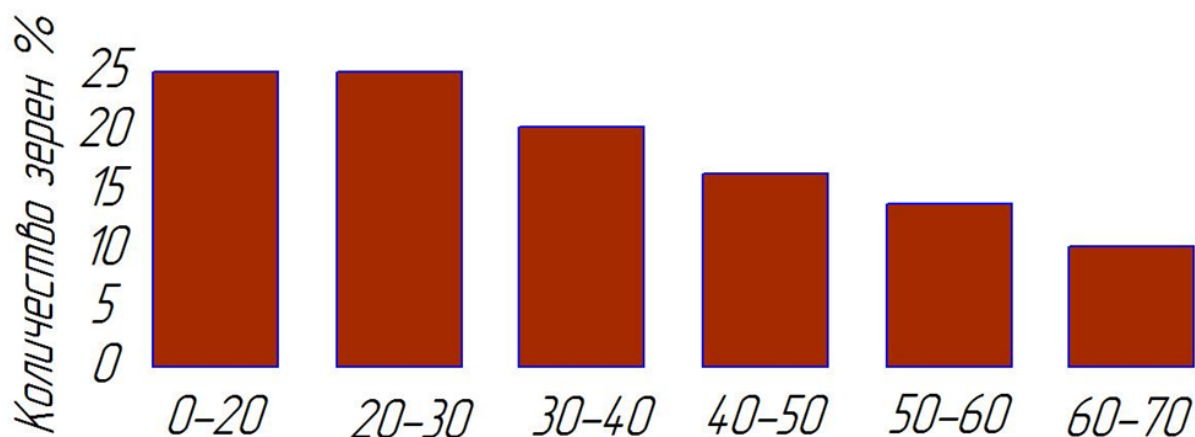


Рисунок 4. Гистограмма распределения ширины площадки при вершине зерна

Распределение на рабочей поверхности круга вершин зерен по высоте  $u$  является неравномерным. Исходное состояние разновысотности вершин алмазных зерен круга после правки и ее изменение при обработке хрупких неметаллических материалов в соответствии с экспериментальными результатами адекватно описывается распределением Вейбулла [7] с плотностью

$$f(u) = \frac{\delta}{\lambda} \cdot u^{\delta-1} \cdot \exp\left(-\frac{u^\delta}{\lambda}\right), \quad (3)$$

где  $\delta$  и  $\lambda$  - параметры распределения ( $\delta > 0, \lambda > 0$ ), определялись экспериментально по результатам профилографирования круга непосредственно на станке.

Пусть вершина зерна находится на расстоянии  $u$  от наружной поверхности круга. В этом случае в сечении рабочей поверхности круга на расстоянии  $c$  ( $c > u$ ) от наружной поверхности круга площадь зерна  $S_{зноп}(u)$  определится как

$$S_{зноп}(u) = \pi \cdot C_b^2 \cdot (c - u)^{2 \cdot m}. \quad (4)$$

Так как распределение зерен по высоте описывается распределением Вейбулла с плотностью  $f(u)$ , то математическое ожидание величины площади, занимаемой зернами на единице рабочей поверхности круга в сечении, расположенном от наружной поверхности круга на расстоянии  $c$ , определится из зависимости

$$A_c(c) = n \int_0^c S_{зноп}(u) f(u) du = \pi \cdot n \cdot C_b^2 \int_0^c (c - u)^{2m} \cdot f(u) du. \quad (5)$$

Используя полученную зависимость 5, можно определить математическое ожидание относительной опорной площади рабочей поверхности круга  $\eta_{рпк}$  для

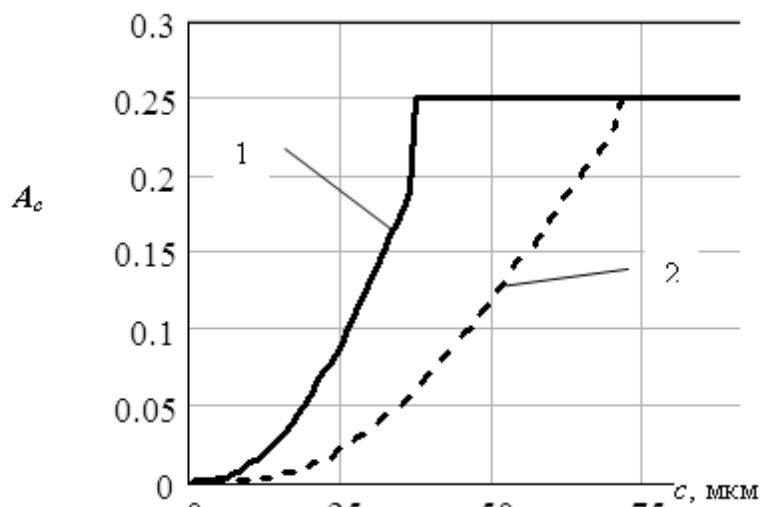


Рис. 5. Расчетные зависимости математического ожидания относительной опорной площади рабочей поверхности круга 1А1 200х20х32 АС6-4-М2-01-125/100 от наружной поверхности круга в пределах глубины РПК: 1 – после правки ( $n_3=20,5$  шт/мм<sup>2</sup>,  $\Delta u=70$  мкм,  $C_b=9,5$ ,  $\delta=2,1$ ,  $\lambda=0,0006$ ); 2 – после удаления 22 см<sup>3</sup>/мм Аl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Гп) ( $n_3=17$  шт/мм<sup>2</sup>,  $\Delta u=35$  мкм,  $C_b=14$ ,  $\delta=1,6$ ,  $\lambda=0,0077$ )

любого расстояния от наружной поверхности круга в пределах глубины РПК ( $0 \leq c \leq \Delta u$ ). На рисунке 5 показано изменение  $\eta_{РПК}$  круга 1А1 250х20х32 АС6 125/100 -4-М2-01-после правки ( $\Delta u=70$ мкм) и после съема 22 см<sup>3</sup> керамики Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Гп) ( $\Delta u=35$ мкм). В обоих случаях относительная опорная площадь рабочей поверхности изменяется от 0 до 0,23 и от 0 до 0,19 у связки соответственно после правки и после длительной работы. Полученные значения

несколько превышают величину относительной опорной площади профиля РПК  $t_p=0,25 \Delta u / \bar{d}_3$ , предложенную в работе [8] для расчета числа алмазных зерен на поверхности круга при концентрации алмазов 100%. Разница в результатах расчета существенно для круга, длительное время находившегося в работе, что связано, по всей видимости, со способностью удержания связкой частично разрушенных и изношенных алмазных зерен. В соответствии с одним из фундаментальных соотношений стереологии (принципом Кавальери-Акера-Глаголева) отношение суммарной площади плоских площадок – сечений алмазных зерен к общей площади секущих плоскостей  $A_c(c)$  (относительная опорная поверхность) будет равно отношению суммарного объема алмазных частиц к объему образца, т.е. объемной доле алмазных зерен ( $V(c)$ ). Объемная концентрация алмазов (при 100%) в круге составляет 0,25. Величина относительной опорной площади алмазных зерен у связки не может превышать указанного значения. Объем, занимаемый зернами на рабочей поверхности круга, возрастает от минимального значения у наружной поверхности к значению немногим меньшим объемной концентрации зерен в связке. Случайное поле алмазных зерен на РПК обладает свойствами однородности и изотропности, т.е. профили любых нормальных сечений РПК имеют одинаковые статистические характеристики. Для оценки рабочей части профиля используют математическое ожидание числа зерен на единице длины круга и математическое ожидание относительной опорной длины профиля зерен на произвольном уровне ( $c$ ). В соответствии с принципом Кавальери-Акера-Глаголева

отношение суммарной длины отрезков, отсекаемых зернами, к общей длине базовой линии  $L(c)$  равно  $L(c)=A_c(c)$ . Таким образом, скалярная характеристика поля ШК характеризует и вероятностную суммарную ширину зерен на данном уровне  $c$ .

**Заключение.** Таким образом, выполненные экспериментальные исследования зерен на РПК показали, что при описании профиля зерен необходимо учитывать наличие площадок износа на них.

Распределение вершин зерен на рабочей поверхности круга можно рассматривать как нестационарное поле с распределением Пуассона. Каждому уровню рабочей поверхности круга соответствует определенная скалярная величина, которая характеризует относительную опорную площадь поверхности алмазных зерен, объемную долю алмазных зерен и определяет возможность в удалении материала припуска инструментом на этом уровне.

В процессе работы круга происходят изменения на его рабочей поверхности, связанные с износом алмазных зерен, которые необходимо учитывать при описании скалярной характеристики круга -математическое ожидание относительной опорной длины профиля зерен на определенном расстоянии от наружной поверхности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев, В. В. Определение параметров разноразности 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.
2. Чернявский, К. С. Стереология в металловедении / К. С. Чернявский – М.: Металлургия, 1977. – 80 с.
3. Шейко, М. Н. Теоретико-вероятностная интерпретация погрешности метода профилографирования при исследовании рельефа абразивно-алмазного инструмента. Сообщение 1. / М. Н. Шейко // Сверхтвердые материалы. – 1998. – №5. – С. 46-50.
4. Королев, А. В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Ч. 2. Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке / А. В. Королев, Ю. К. Новоселов. – Саратов: издательство Саратовского университета, 1989. – 160 с.
5. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник./ Под ред. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391с.
6. Лукин Л. Н. Элементы теории алмазно-абразивного инструмента и процесса резания – царапанья металла моделью алмазного зерна: автореф. дис... канд. тех. наук: 05.03.01 / Л. Н. Лукин. – Томск, 1968. – 19 с.
7. Гусев, В. В. Закономерности изменения состояния рабочей поверхности алмазного круга при шлифовании керамики / В. В. Гусев, А. Л. Медведев, В. В. Савельев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Машинобудування і машинознавство». – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – Вип. №4 (124). – С. 21-30.
8. Федорович, В. А. Динамика изменения параметров рабочей поверхности круга при шлифовании СТПМ / В. А. Федорович // Резание и инструмент в технологических системах – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. №56. – С. 154-163.

Поступила в редколлегию 30.05.2017 г.