

УДК 621.923

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

© Владимир Борисович Богуцкий

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Россия

bogutskivb@yandex.ru

***Аннотация.** В статье на основе анализа зоны контакта шлифовального круга с заготовкой предложена модель процесса круглого наружного шлифования, позволяющая производить расчет оптимальных циклов и параметров его коррекции. Приведены результаты расчетов длины пути резания и износа наиболее выступающих абразивных зерен от скорости заготовки и фактической глубины резания.*

***Ключевые слова:** шлифование, абразивное зерно, износ шлифовального круга, модель износа, расчет оптимальных циклов.*

MODELING OF WEAR OF THE ABRASIVE TOOL

© V.B. Bogutsky

Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

bogutskivb@yandex.ru

***Abstract.** In the article, based on the analysis of the contact zone of the grinding wheel with the workpiece, is proposed a model of the process of circular external grinding, which allows calculating the optimal cycles and parameters of its correction. Presented the results of calculations of the length path of the cutting and wear of the most protruding abrasive grains from the workpiece speed and the actual cutting depth.*

***Keywords:** grinding, abrasive grain, wear of grinding wheel, wear model, calculation of optimal cycles.*

Введение. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования процесса шлифования позволяют сделать заключение, что производительность зависит от активности протекания процессов микрорезания абразивными зёрнами. [1-6]. На процессы формирования поверхностей при шлифовании оказывают влияние все параметры характеристики абразивного инструмента: материал зёрна, зёрнистость, материал связки, твердость, структура круга. Особое внимание уделяется рабочей поверхности инструмента, которая непосредственно контактирует с заготовкой и в значительной степени определяет основные закономерности процесса обработки [1, 2, 5-11].

1. Изложение основного материала. Как показано в [3, 5, 10-15] в процессе шлифования на абразивных зернах появляются площадки износа, за счет разрушения изменяется число абразивных зерен на единице поверхности, их распределение по глубине инструмента. Все это приводит к увеличению сил резания, температуры шлифования, вибраций в технической системе. При достижении критического износа зерен процесс шлифования становится неэффективным, требуется правка круга. Все это обосновывает необходимость разработки модели процесса, позволяющей производить расчет оптимальных циклов и параметров его коррекции. В качестве исходной модели износа абразивного инструмента примем модель, предложенную в работах [16, 17]. Согласно схемы зоны контакта заготовки с инструментом (рис. 1) приращение износа вершины абразивного зерна $h_{\Delta u}$, расположенного на расстоянии u от условной наружной поверхности абразивного инструмента, при i -м контакте инструмента с материалом за время $d\tau$ можно вычислить по зависимости

$$dh_{\Delta u} = h_0 \cdot P(\overline{M}) \cdot V_k \cdot d\tau, \quad (1)$$

где h_0 – величина относительного износа материала зерна; $P(\overline{M})$ – вероятность неудаления материала (численно равна вероятности контакта вершины зерна с материалом заготовки в зоне контакта P_k); V_k – окружная скорость круга;

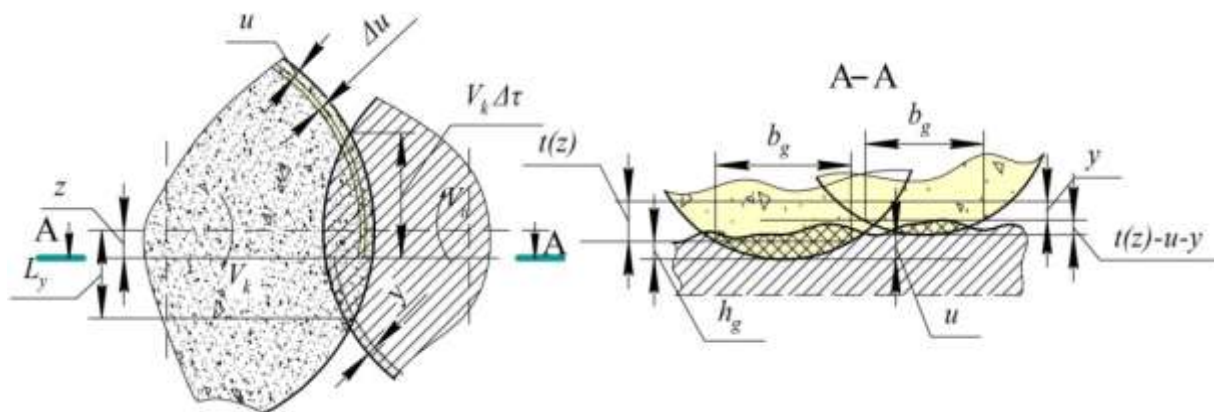


Рис. 1. Схема зоны контакта заготовки с инструментом в момент времени τ .

При установившемся процессе круглого шлифования $P(\overline{M})$ вычисляется по зависимости [18]:

$$P(\overline{M}) = \exp\left(-\frac{\pi K_c n_g (V_k \pm V_u) \sqrt{2\rho_g}}{V_u H_u^{1.5}}\right) \times \left[0.4\sqrt{D_e} \times \sum (t_f - y_i - i \cdot \Delta r)^{1.5} + \frac{3}{8}(t_f - y_i - i \cdot \Delta r)^2 \times \left(z - \frac{2z^3}{3L^2} + \frac{z^5}{3L^4} + \frac{8}{15}L_y \right) \right] \quad (2)$$

где K_c – коэффициент стружкообразования (согласно [4] $K_c = 0.3t_f^{-0.56}V_k^{0.08}$); n_g – число зерен на поверхности инструмента после правки; ρ_g – радиус скругления вершины абразивного

зерна; V_u – окружная скорость обрабатываемой детали; H_u – глубина слоя рабочей поверхности шлифовального круга, в пределах которого определяется n_g ; D_e – эквивалентный диаметр, t_f – фактическая глубина резания; y_i – расстояние от поверхности, ограничивающей слой исходной шероховатости со стороны среды, до уровня заготовки, с которым пересекается вершина зерна в момент времени τ (см. рис. 1), Δr – радиальный съём материала при единичном контакте обрабатываемой поверхности детали с шлифовальным кругом; z – расстояние от основной плоскости до вершины зерна по координате z ; L_y – расстояние от основной плоскости до точки пересечения с уровнем у условной наружной поверхности круга.

2. Результаты расчетов. На рис. 2. приводятся расчетные значения длины пути резания l_g абразивными зёрнами, лежащими на различной глубине рабочего слоя абразивного инструмента при трех значениях t_f для случая шлифования закаленных образцов ($K_c=0.9$) кругами зернистостью F60 ($n_g=5,2 \text{ 1/мм}^2$; $\rho_g=0,021 \text{ мм}$). Диаметр круга при расчетах принят равным 250 мм, диаметр заготовки 55 мм. Данные получены интегрированием в программе Maple 17 уравнения (1). При всех значениях наибольшая длина пути резания соответствует зёрнам, вершины которых лежат на условной рабочей поверхности инструмента ($u=0$), для абразивных зёрен, лежащих в глубине рабочего слоя, длина пути резания быстро уменьшается и при $u \approx 0.75t_f$ асимптотически приближается к нулю. Зависимости износа вершины абразивного зёрна аналогичны зависимостям длины пути резания и отличаются от них только масштабным фактором.

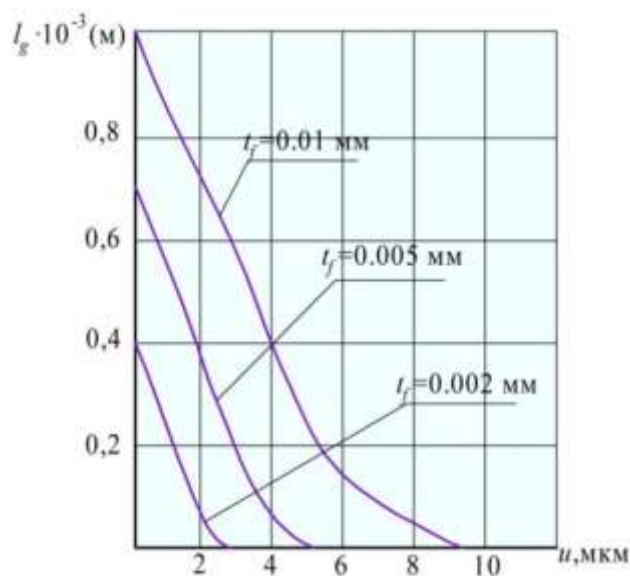


Рис. 2. Расчетные значения длины пути резания l_g абразивными зёрнами, лежащими на различной глубине рабочего слоя абразивного инструмента.

Анализ формы кривых показывает, что аналитически они могут быть аппроксимированы степенной зависимостью вида

$$h_{\Delta u} = h_0 \left(1 - \frac{u}{t_f} \right)^\beta \quad (3)$$

где β – коэффициент, определяемый аналитически.
Для рассматриваемого примера получена зависимость

$$h_{\Delta u} = h_0 \left(1 - \frac{u}{t_f} \right)^2 \quad (4)$$

Сопоставление расчетных значений, полученных по точной зависимости (1) и по приближенной зависимости (3) показывает, что при значениях 0,75 они отличаются не более, чем на 5% величины износа наиболее выступающих зерен. При включении в математическую модель износа зависимости (4) становится возможным для кругов, работающих в режиме затупления, вести расчет только для наиболее выступающих зерен и по ним судить о износе всех зерен, лежащих в рабочем слое инструмента.

Для таких зерен зависимость от z из геометрических расчетов имеет вид $y_j = t_f - \frac{z^2}{D_e}$ (5), Δr

определяется из уравнения $\Delta r = \frac{t_f^2}{1,478t_f + \frac{13,66V_k}{K_c(V_k \pm V_u)n_g \sqrt{D_e \rho_g}}}$ (6) а расстояние $z = -L_y$ при

прохождении вершиной зерна участка зоны контакта ниже основной плоскости и $z = L_y$ при прохождении вершиной участка выше основной плоскости.

Уравнение (2) для наиболее выступающих зерен примет вид:

$$P_k = \begin{cases} \exp\left(-0.4G\sqrt{D_e} \sum_{i=2}^n \left(\frac{z^2}{D_e} - i\Delta r\right)^{1.5}\right), & \text{где } z < 0 \text{ и } \frac{z^2}{D_e} - \Delta r > 0, \\ 0, & \text{при } z \leq 0 \text{ и } \frac{z^2}{D_e} - \Delta r \leq 0, \\ \exp\left(-0.4G\left(\sqrt{D_e} \sum_{i=2}^n \left(\frac{z^2}{D_e} - i\Delta r\right)^{1.5} + \left(\frac{z^2}{D_e} - \Delta r\right)z\right)\right), & \text{при } z > 0 \end{cases} \quad (7)$$

где $G = \frac{\pi K_c n_g (V_k \pm V_u) \sqrt{2\rho_g}}{V_u H_u^{1.5}}$.

Для вычисления износа наиболее выступающих зерен по уравнениям (1) и (7) необходимо привести их к единой переменной. Из геометрической схемы (см. рис.1) следует, что

$$dz = V_k \cdot d\tau \cdot \cos\alpha. \quad (8)$$

где α – угол между вектором скорости резания и осью z . Учитывая, что угол α для круглого наружного шлифования не превышает, $\cos\alpha \geq 0,999$, можно принять

$$dz = V_k \cdot d\tau. \quad (9)$$

Износ вершины зерна при одном k - m контакте с изделием рассчитывается интегрированием уравнения (1) (см. зависимость (10)), а за время τ – по уравнению (11)

$$h_{\Delta u} = h_0 \int_{-L}^L P(\overline{M}) dz. \quad (10) \quad h_g(\tau) = h_{\Delta u} \cdot v_k \cdot \tau. \quad (11)$$

где L – расстояние от пересечения вершины зерна с уровнем $y=0$; v_k – угловая частота вращения круга.

На рис. 3 приведены расчетные зависимости износа наиболее выступающих абразивных зерен от скорости заготовки и фактической глубины резания при шлифовании закаленной стали $\varnothing 55$ мм кругом 1 250×32×127 24AF60LV, при $V_k=33$ м/с; $V_u=0,3$ м/с; $K_c=0,9$; $\rho_g=0,021$ мм; $n_g=5,2 \times 10^5$ 1/м².

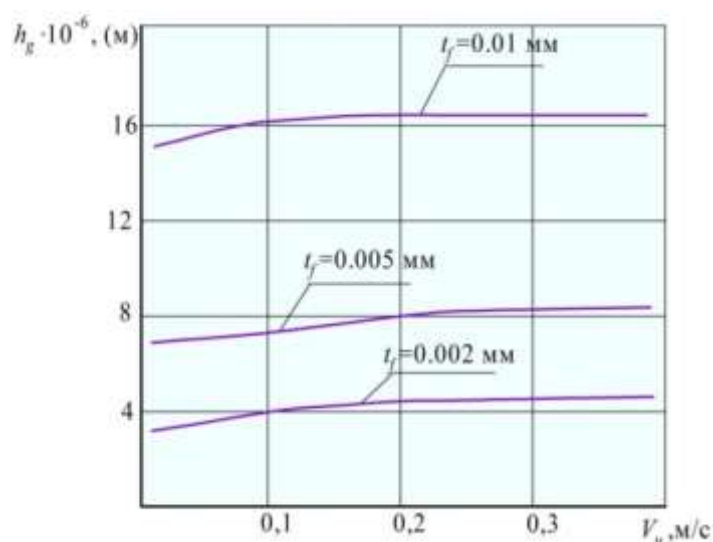


Рис. 3. Зависимость износа наиболее выступающих зерен от скорости детали и фактической глубины резания.

Износ зерна при постоянстве практически не зависит от скорости изделия. Таким образом уравнения износа носят функциональный характер и позволяют рассчитать его для различных режимов шлифования.

3. Прогнозирование состояния поверхности шлифовального круга. Для прогнозирования параметров состояния рабочей поверхности абразивного шлифовального круга разработан алгоритм (реализован на персональном компьютере), включающий следующие основные этапы:

1. Ввод данных, отражающих исходное состояние технологической системы (режимы обработки, значения параметров инструмента при $\tau=0$, значения относительного износа, жесткость технологической системы, шаг вычислений по r и r_{max}).
2. Определение режима работы инструмента: работа в режиме затупления, самозатачивания, частичного самозатачивания. Режим работы инструмента определяется сравнением величины силы резания, допускаемой технологической системой с прочностью закрепления зерен в круге и прочностью их кромок [4, 12].
3. Расчет фактической глубины резания для первого шага ($\tau=h_\tau$) – выполняется решением уравнения баланса перемещений в технологической системе [4, 18].

$$\Delta A_{sj} = \Delta t_{fj} + \Delta R_j + \Delta r_{j-1} + \sum_{k=1}^n \Delta y_{yjk} + \sum_{k=1}^m \Delta y_{qjk} \quad (12)$$

где ΔA_{sj} , Δy_{yjk} , Δy_{qjk} , – изменения межцентрового расстояния вследствие наличия подачи, упругих и температурных деформаций за время от совмещения радиус-вектора рассматриваемого участка поверхности заготовки с плоскостью, проходящей через центра вращения круга и детали при $j-1$ -м и j -м контактах; ΔR и Δr_{j-1} – радиальный износ круга и радиальный сьем материала в ранее принятые интервалы времени; Δt_{fj} – изменение глубины микрорезания при j – м контакте; $\sum_{k=1}^n \Delta y_{yjk}$ и $\sum_{k=1}^m \Delta y_{qjk}$ – суммарные приращения упругой и температурной деформаций элементов технологической системы.

4. Расчет величины износа вершин режущих кромок наиболее выступающих зерен. Согласно [4] профиль вершины изношенного зерна в плоскости перпендикулярной вектору скорости резания, однозначно определяется глубиной микрорезания и износом вершины абразивного зерна

$$b_g(\tau) = C_b h_\tau^m \left(\frac{t_f - u}{t_f - u - h_g} \right)^m \quad (13)$$

где h_τ – расстояние от вершины изношенного зерна до рассматриваемого уровня.

5. Расчет параметров формы зерен и их распределения по поверхности при моделировании плотности вероятности β -распределением – уравнения (14) и (15).

$$C_g(\tau) = C_b \left(\frac{t_f - u}{t_f - u - h_g} \right)^m \quad (14)$$

$$\beta_{m,n}(x) = \frac{1}{B(m,n)} [u - h_g(u)]^{m-1} \times [1 - u - h_g(u)]^{n-1} \times \frac{d(u - h_g(u))}{du} \quad (15)$$

где $B(m,n)$ – значение бета - функции; m и n – параметры β – распределения.

6. Расчет параметров формы инструмента (текущего радиус-вектора круга $R_0(\gamma, t)$). При расчете рассматривается его наиболее характерное сечение. Принято, что изменение отклонений формы круга в остальных сечениях будет происходить также как и в рассматриваемом, а превалирующая гармоника вносит в отклонения формы круга

наибольшее влияние (в работах [14, 17] экспериментально подтверждено, что случайными отклонениями формы круга можно пренебречь). При этих условиях уравнение для расчёта $R_0(\gamma, t)$ будет иметь вид

$$R(\gamma, t) = R_0 + A_i \cos l\gamma - \int_0^t \bar{S}(\tau) d\tau - \int_0^t A_s l(\tau) \cos(l\gamma + \psi l) d\tau. \quad (16)$$

где R_0 – начальный радиус-вектор круга; $\bar{S}(\tau)$ – средняя скорость радиального износа круга в момент времени τ ; A_l, A_s – амплитуды преобладающих гармоник исходного профиля круга и скорости его износа; ψl – фаза i -й гармоники износа (принимается равной фазе колебательной составляющей радиальной силы резания по отношению к исходной волнистости поверхности круга и определяется по зависимости (17) полученной в работе [17])

$$\operatorname{tg} \psi l = \frac{A_{k_{i-1}} \sin \psi_{k_{i-1}} + A_i \cdot \sin \psi_{l_i}}{A_{k_{i-1}} \cos \psi_{k_{i-1}} + A_i \cdot \cos \psi_{l_i}}. \quad (17)$$

где $A_{k_{i-1}}, A_{l_i}, \psi_{k_{i-1}}, \psi_{l_i}$ – амплитуды и фазы отклонений профилей детали и шлифовального круга соответственно.

7. Изменение $\tau - \tau_{i+1} = \tau_i + h_{\tau}$, коррекция входных данных.

8. Сопоставление τ_{i+1} с τ_{max} , принятие решения о продолжении выполнения расчетов или их окончании и печати результатов.

Для решения задачи коррекции производительного цикла шлифования кроме зависимостей предложенных выше, используются зависимости, устанавливающие связь характеристик поверхности инструмента и режимов обработки с характеристиками качества обрабатываемой детали и производительностью процесса, которые приведены в работах [4, 13, 19, 20], согласно которым:

- радиальный съём материала – зависимость (6);

- фактическая глубина микрорезания – $t_f = 0,739\Delta r + \sqrt{0,546\Delta r^2 + \frac{13,66V_u\Delta r}{K_c(V_k \pm V_u)^{0,4}n_g^{0,4}\sqrt{D_e\rho_g}}}$;

- среднее арифметическое отклонение профиля – $R_a = \frac{0,25V_u^{0,4}t_f^{0,6}}{K_c^{0,4}(V_k \pm V_u)^{0,4}n_g^{0,4}D_e^{0,2}\rho_g^{0,2}}$;

- тангенциальная составляющая силы резания –

$$P_z = \frac{C_b \cdot \chi \cdot l_k n_g h_g^m (t_f - \Delta r)^{\chi+0,5} \tau_s \sqrt{D_e}}{t_f^z} \times \left[0,96B(\chi; z_m + 3,5)(t_f - \Delta r) \frac{\sin \beta}{\sin \beta_1} + \frac{\pi \mu C_b h_g^m}{6} B(\chi; 2mz + 2,5) \right];$$

- радиальная составляющая силы резания –

$$P_y = \frac{C_b \cdot \chi \cdot l_k n_g h_g^m (t_f - \Delta r)^{\chi+0,5} \tau_s \sqrt{D_e}}{t_f^\chi} \times \left[0,96 B(\chi; z_m + 3,5) (t_f - \Delta r) \frac{\sin \beta}{\sin \beta_1} + \frac{\pi C_b h_g^m}{6} B(\chi; 2mz + 2,5) \right].$$

где l_k – длина контакта поверхности круга с обрабатываемой поверхностью; $B(\chi; z_m+3,5)$ и $B(\chi; 2mz+2,5)$ – значения табулированной бета-функции; τ_s – среднее касательное напряжение в плоскости сдвига; β – угол между равнодействующей силы резания и скорости резания; β_1 – угол сдвига; μ – коэффициент трения зерна о металл, по данным [21] для электрокорунда по стали $\mu = 0,2$, C_b , m – коэффициент пропорциональности и показатель степенной зависимости; определяемые экспериментально.

Заключение. Для кругов работающих в режиме затупления происходит увеличение плотности распределения зерен на глубине инструмента в 1,2...1,3 раза до момента их разрушения и выкрашивания из связки, после чего наблюдается падение кривой плотности распределения зерен по глубине. В процессе работы шлифовального круга на вершинах абразивных зерен образуются площадки износа, вызывающие снижение режущей способности зерен и возрастание сил резания. Наибольшее влияние на износ абразивных зерен круга оказывают фактическая глубина микрорезания, скорость инструмента и величина относительного износа абразивного материала. Показано, что в начальный период после правки возможности шлифовального круга используются не полностью. Указанный недостаток может быть устранен коррекцией циклов шлифования на основе использования приведенных в работе зависимостей и известной теоретико- вероятностной модели процесса.

Список литературы

1. CRC Materials Science and Engineering Handbook, Third Edition. /Edited By *William Alexander, James F. Shackelford*. - Boca Raton: CRC Press LLC, 2001. – 1980 p.
2. *W. Brian Rowe*. Principles of modern grinding technology. - Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: UK, 2009. – 421 p.
3. *Hassan Abdel-Gawad El-Hofy*. Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes: CRC Press, 2006. – 562 p.
4. *Новоселов Ю.К.* Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке: моногр. – Севастополь: Из-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
5. *Stephen Malkin, Changsheng Guo*. Grinding technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives. Industrial press. - New York, 2008. – 372 p.
6. *Robert I. King, Robert S. Hahn*. Handbook of Modern Grinding Technology. - Springer Science & Business Media, 2012. – 360 p.
7. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / Под ред. Резникова А.Н. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
8. *Кремень З.И.* Технология шлифования в машиностроении. - СПб.: Политехника, 2007. – 424 с.
9. *Ioan D. Marinescu, Mike P. Hitchiner, Eckart Uhlmann, W. Brian Rowe, Ichiro Inasaki*. Handbook of Machining with Grinding Wheels: CRC Press, 2006. – 632 p.
10. *Новоселов Ю.К., Богуцкий В.Б., Дзюбаба Р.Н.* Прогнозирование параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке//Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. - № 8-1. – С. 262–269.
11. *Королев А.В., Березняк Р.А.* Прогрессивные процессы правки шлифовальных кругов. – Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1984. – 112 с.

12. *Татаркин Е.Ю., Роцупкин П.В.* Характеристика абразивного инструмента и изменение его профиля за период стойкости // В кн.: Чистовая обработка деталей машин. – Саратов, 1985. – С.47–51.
13. *Новосёлов Ю.К., Богущкий В.Б.* Износ абразивных зерен в круге при шлифовании заготовок// Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. Вип. 129/2012. – Севастополь, 2012. – С. 23–29.
14. *Татаркин Е.Ю.* Анализ влияния профиля рабочей поверхности шлифовального круга на точность обработки // В кн.: Процессы и оборудование абразивно-алмазной обработки. - М.: ВЗМИ, 1986. – С.79–82.
15. *Novoselov Yu., Bogutsky V., Shron L.* Patterns of removing material in workpiece - grinding wheel contact area// 4-nd International conference on industrial engineering (ICIE-2017). Procedia engineering. – 2017. - Vol. 206. – P. 991–996.
16. *Татаркин Е.Ю., Леонов С.Л.* Методика прогнозирования профиля абразивного инструмента в процессе шлифования //Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов: Тез. докл. науч.-техн.конф. – Новосибирск, 1982 – С.57–58.
17. *Татаркин Е.Ю.* Обеспечение стабильности точности деталей путем управления процессом круглого наружного шлифования: дисс. канд. техн. наук. - Барнаул, 1983. – 209 с.
18. *Novoselov Yu., Bratan S., Bogutsky V.* Analysis of relation between grinding wheel wear and abrasive grains wear // 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016)/ Edited by Andrey A. Radionov. Procedia Engineering. – 2016. - Vol. 150. – P. 809–814.
19. *Novoselov Yu. Bogutsky V., Shron L., Kharchenko A.* Forecasting the surface roughness of the workpiece in the round external grinding// MATEC Web of Conferences «International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017». – 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201712901080.
20. *Bogutsky V.* Influence of change of geometric characteristics of abrasive grain in the process of grinding on the surface roughness parameters// Theoretical & Applied Science. – 2018. - № 7 (63). – С. 101-108. DOI: 10.15863/TAS
21. *Богомолов Н.И.* Исследование деформации металла при абразивных процессах под действием абразивного зерна / Н. И. Богомолов // Труды ВНИИМАШ. – 1968. - Вып.7, – С.77–88.

Дата поступления: 1 марта 2019 г.