

УДК 621.92

В.Б. Богуцкий, ст. преподаватель**Ю.К. Новосёлов, профессор, д-р техн. наук,***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**root@sevgtu.sebastopol.ua***ИЗНОС АБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН В КРУГЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ЗАГОТОВОК***Анализируются особенности работы абразивного зерна в зоне контакта на примере круглого наружного шлифования.***Ключевые слова:** *абразивное зерно, микрорезание, износ, вероятность контакта, путь резания.*

Износ абразивного инструмента – достаточно сложное явление, зависящее от многих факторов: свойств абразивного материала и его зернистости, геометрических параметров круга, вида и режимных параметров процесса обработки материалов, свойств связки и ее твердости.

Анализ причин износа, включающий специфику физико-механических процессов, протекающих в зоне контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом, дает возможность установить наличие нескольких обособленных режимов износа, выявить их характерные области распространения, а также возможные схемы перехода из одного режима в другой. В процессе обработки вследствие изнашивания поверхности круга, происходит изменение числа активных вершин, проходящих через зону контакта круга и заготовки. Это изменение происходит с каждым оборотом круга в результате различных процессов изнашивания вершин, вступления в работу новых вершин из вышележащих слоев при их перемещении на величину радиального износа круга за один оборот в направлении от центра вращения к периферии рабочей поверхности круга. Поэтому, определение износа вершины зерна круга является важным и необходимым этапом для изучения особенностей процесса круглого шлифования заготовок.

Механизм износа единичных абразивных зерен и явления, возникающие при контакте зерна с материалом, наиболее детально изучены в работах Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучавы, Н.И. Богомолова и ряда других исследователей [1], однако следует отметить, что кинетика процесса износа единичных абразивных зерен в большинстве работ не рассматривалась, что не позволяет прогнозировать работу единичного зерна и, как следствие, прогнозировать работоспособность шлифовального круга.

Цель работы – изучить закономерности износа абразивных зерен шлифовального круга.

Износ абразивного зерна происходит в зоне контакта, которая возникает при сближении инструмента и заготовки. Зона контакта при круглом шлифовании представляет собой, в геометрическом изображении, форму двух сегментов BCD и DEB (рисунок 1, а), однако, действительная форма зоны контакта отличается от её геометрического изображения в связи с тем, что в результате контакта абразивных зерен с материалом обрабатываемой детали её радиус уменьшается на величину радиального съема материала Δr , радиус шлифовального круга на величину его радиального износа ΔR , а на поверхности остается слой шероховатости поверхности. Упругие и температурные деформации элементов технологической системы изменяют глубину микрорезания, под действием сил возникающих при микрорезании абразивные зерна утапливаются в связку инструмента и линия, ограничивающая зону контакта со стороны материала, будет смещаться к центру вращения круга.

Действительная глубина микрорезания t_f (рисунок 1, а) может быть определена по режимам обработки на основе решения уравнения баланса перемещений в технологической системе [3].

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

где ΔA_{sj} – поперечная подача на оборот детали; ΔR_j – радиальный износ инструмента; Δr_{j-1} –

величина радиального съема металла; $\sum_{k=1}^n \Delta y_{yjk}$ и $\sum_{k=1}^m \Delta y_{qjk}$ – суммы приращений упругих и температурных деформаций элементов технологической системы.

Абразивные зерна на рабочей поверхности круга расположены на различной глубине u от условной наружной поверхности инструмента и их работа зависит от длины траекторий движения в зоне контакта и условий контакта с обрабатываемым материалом. До входа в зону контакта детали с кругом обрабатываемая поверхность имеет определенный микрорельеф, образовавшийся на предыдущей операции или при текущем процессе шлифования. Единичное зерно при шлифовании, проходя зону контакта детали с кругом, может срезать материал, если попадает на один из выступов шероховатости

поверхности, или не срезать его, если попадет в одну из впадин шероховатости. При встрече зерна с выступом увеличивается доля удаленной части материала, а если зерно попадает во впадину – материал не снимается. В каждой точке условия контакта абразивного зерна с материалом детали отличаются.

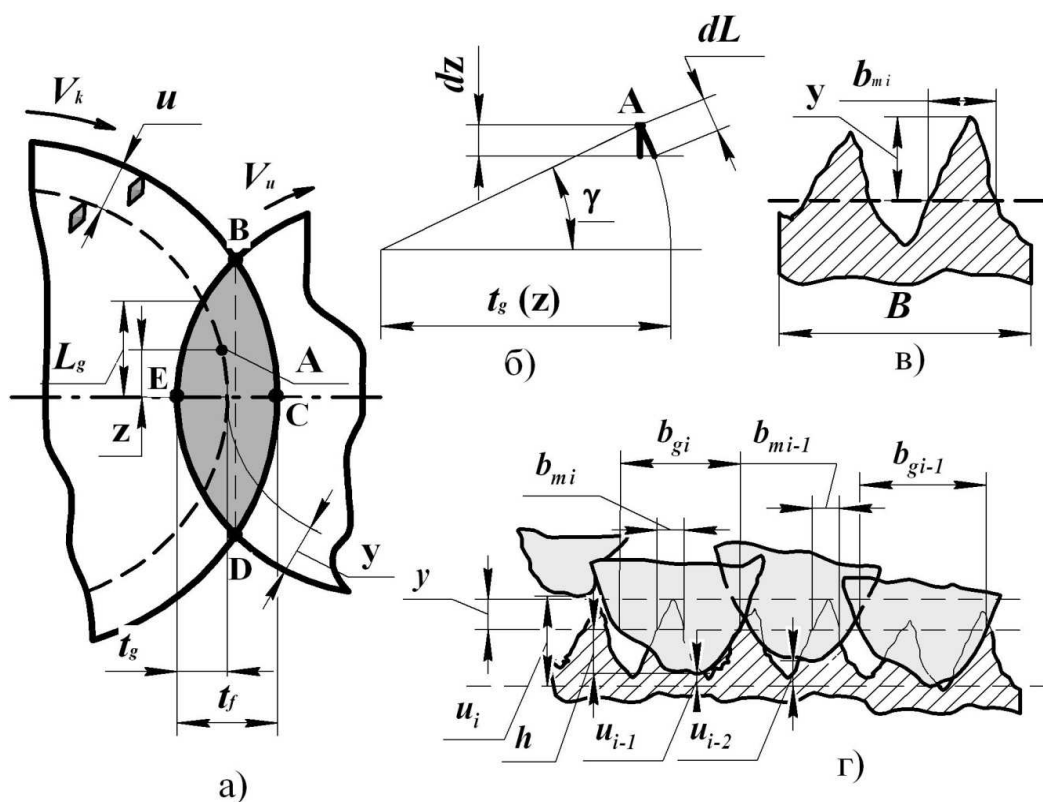


Рисунок 1 – Схема к расчету пути резания единичного абразивного зерна

Для абразивного зерна, которое расположено на расстоянии u от условной наружной поверхности инструмента (рисунок 1, а) глубина микрорезания в основной плоскости, которая проходит через центры шлифовального круга и детали

$$t_g = t_f - u.$$

При движении в зоне контакта, глубина микрорезания $t_g(z)$ определяется как разность

$$t_g(z) = t_g - \frac{z^2}{D_s}.$$

Контактируя с поверхностью детали, зерно пересекает разные её уровни и в зависимости от состояния поверхности, процент удаленных и не удаленных частей материала различен. Значение y увеличивается от 0 до t_g , а затем уменьшаться до 0, т.е. величина y является разной для каждой точки контакта (рисунок 2).

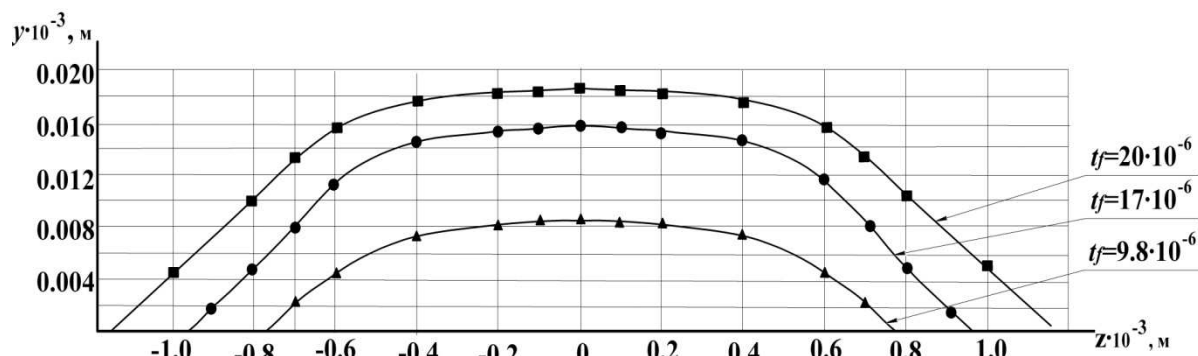


Рисунок 2 – Изменение величины y при движении абразивного зерна в зоне контакта ($u=\text{const}$)

Для определения величины y рассмотрим j -й контакт инструмента и обрабатываемой поверхности (рисунок 3). Расстояние от верхней границы слоя шероховатости до фиксированного уровня при выполнении j -го контакта равно y_j , при выполнении $j-1$ -го контакта y_{j-1} , при выполнении $j-2$ -го y_{j-2} , при выполнении $j-i$ -го y_{j-i} . Вследствие наличия микрорезания, после выхода из зоны контакта, радиус заготовки уменьшается на величину радиального съема материала Δr .

Тогда согласно схеме на рисунке 3:

для $j-1$ -го контакта $y_{j-1} = y_j + \Delta r_{j-1}$;

для $j-2$ -го контакта $y_{j-2} = y_{j-1} + \Delta r_{j-2} = y_j + \Delta r_{j-1} + \Delta r_{j-2}$;

для $j-3$ -го контакта $y_{j-3} = y_{j-2} + \Delta r_{j-3} = y_j + \Delta r_{j-1} + \Delta r_{j-2} + \Delta r_{j-3}$;

для $j-i-1$ -го контакта $y_{j-i-1} = y_j + \Delta r_j + \dots + \Delta r_{j-i} = y_j + \sum_{k=j-1}^j \Delta r_k$.

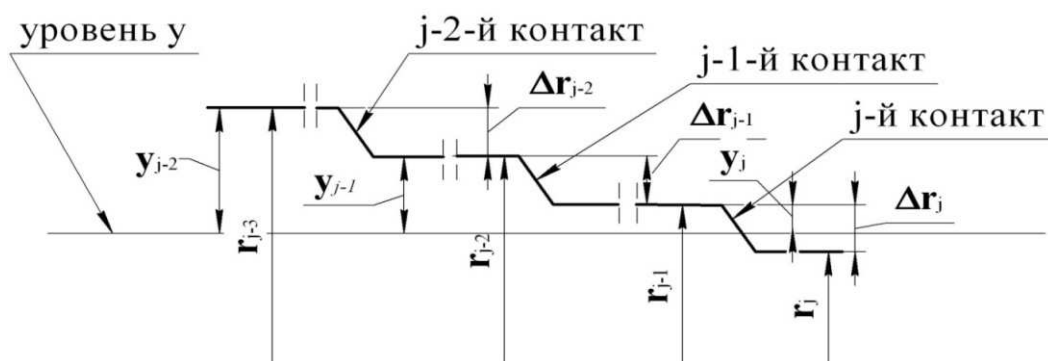


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения величины y

Обрабатываемый материал на уровне y_j будет удаляться только для тех контактов, при которых глубина микрорезания больше расстояния до уровня y_{j-i} , т.е. соблюдается условие: $t_f \geq y_{j-i}$.

Рассмотрим износ единичного абразивного зерна. Вероятность неудаления материала на уровне y (рисунок 1, в) определяется по пределу отношений суммы длин отрезков b_{mi} , заполненных материалом, к длине сечения B , стремящейся к бесконечности

$$P(\bar{M}) = \lim_{B \rightarrow \infty} \frac{\sum b_{mi}}{B},$$

а вероятность контакта P_k вершины абразивного зерна с обрабатываемым материалом в соответствии со схемой (рисунок 1.в) рассчитывается как

$$P_k = \lim_{B \rightarrow \infty} \sum \frac{b_{mi}}{B},$$

что совпадает с вероятностью неудаления материала, которая для любой точки зоны контакта равна $P(\bar{M})$. Как показано в работе [3]

$$P(\bar{M}) = e^{-a_0 - a_1 - a_2 - \dots - a_j(y)}, \quad (2)$$

где j – номер контакта абразивного зерна с материалом детали, a_0 – показатель определяющий исходное состояние поверхности, $a_1, a_2, \dots, a_j$ – показатели, характеризующие изменение вероятности удаления материала после первого, второго и т.д. касаний детали с кругом.

Если поверхность получена в результате обработки инструментом, не имеющим регулярной геометрии, то вероятность удаления металла с учетом наличия исходной шероховатости определяется по зависимости

$$P(M) = 1 - e^{-a(y) - a(y, \tau)}. \quad (3)$$

где a_0 – показатель, определяющий вероятность удаления материала на уровне y (см. рисунок 1, в) до входа поверхности в зону контакта детали с кругом; $a(y, \tau)$ – показатель, определяющий изменение вероятности удаления материала на уровне y , в зоне контакта детали с кругом.

При обработке материалов резанием в стадии установившегося износа обычно принимается, что размерный износ пропорционален величине относительного износа h_0 , зависящего от марки инструментального материала, обрабатываемой детали и пути резания $L_{рез}$

$$h_g = h_0 \cdot L_{рез}. \quad (4)$$

Рассмотрим условия контактирования абразивного зерна с обрабатываемым материалом в точке А (рисунок 1, а). Суммарная длина пути резания будет зависеть от длины траектории движения абразивных зерен в зоне контакта и вероятности контакта. Уравнение (4) следует записать в приращениях $dL_{рез}$

$$dh_g = h_0 \cdot dL_{рез},$$

где $dL_{рез}$ должно быть определено с учетом вероятности контакта абразивного зерна с материалом детали P_k , т.е.

$$dL_{рез} = P_k \cdot dL. \quad (5)$$

Из рисунка 1.б следует, что

$$dL = dz \cdot \cos \gamma.$$

Для условий чистового и тонкого шлифования, когда применяется абразивный инструмент диаметром 300 и более миллиметров, а длина зоны контакта L_g (см. рисунок 1.а) составляет 0,25...1мм, угол γ равен $0,144^\circ \dots 0^\circ$ и соответственно, косинус угла равен 0,99...1,0, а величина dL примерно равна dz . Заменим в уравнении (5) dL на dz , тогда длина пути резания единичным абразивным зерном

$$L_{рез} = \int_{-L_g}^{L_g} P_k dz, \quad (6)$$

а зависимость для расчета износа абразивного зерна будет выглядеть как

$$h_g = \int_{-L_g}^{L_g} h_0 P(\overline{M}) dz, \quad (7)$$

где L_g – расстояние от основной плоскости до пересечения уровня с условной наружной поверхностью детали (см. рисунок 1,а), для исследуемого контакта определяется как $L_g = \sqrt{t_g D_g}$, D_g – эквивалентный диаметр, $D_g = \frac{D_{кр} \cdot d_\delta}{D_{кр} + d_\delta}$.

Изменение параметра $a_j(y)$ в уравнении (2) определяется приращением суммы поперечных размеров профилей абразивных зерен [3]:

$$\Delta a(y; \tau) = K_c n_g b_g f(u) \Delta u (V_k \pm V_u) \Delta \tau, \quad (8)$$

где K_c – коэффициент стружкообразования, который учитывает, что не весь материал удаляется из объема риски, а часть его вытесняется и образует по краям риски навалы; n_g – количество вершин зерен на единицу поверхности рабочего слоя круга; b_g – ширина профиля вершины зерна; V_k – скорость круга; V_u – скорость детали; $f(u)$ – плотность вероятности распределения вершин зерен по глубине инструмента.

Перейдем от дискретной модели к непрерывной и получим интегральное уравнение для расчета параметра $a(y; z)$ в зоне контакта детали с кругом

$$a(y, z) = \int_{-L_y}^z \int_0^{t(z)-y} K_c n_g b_g f(u) \frac{V_k \pm V_u}{V_u} du dz, \quad (9)$$

где L_y – расстояние от основной плоскости до пересечения уровня y с условной наружной поверхностью инструмента, $L_y = \sqrt{(t_f - y)D_g}$.

Ширина профиля вершины зерна b_g (см. рисунок 1,г), соответствующая рассматриваемому уровню y , при моделировании степенной зависимостью [2] вычисляется по уравнению:

$$b_g = C_b h^m = C_b [t(z) - y - u]^m = C_b \left(t_f - y - u - \frac{z^2}{D_g} \right)^m, \quad (10)$$

где $C_b; m$ – коэффициент пропорциональности и показатель степенной зависимости; h – расстояние от вершины зерна до рассматриваемого уровня.

В работе [2] предложено аппроксимировать участок кривой распределения режущих кромок активных зерен на рабочей поверхности инструмента степенной зависимостью вида

$$f(u) = \frac{\chi}{H_u^\chi} u^{\chi-1}, \quad (11)$$

где H_u – величина слоя рабочей поверхности круга по глубине, в пределах которого подсчитывается число абразивных зерен n_g , ($H_u \approx t_f$), χ – показатель степенной зависимости.

При подстановке в уравнение (9) выражений b_g и $f(u)$ из уравнений (10) и (11), интегрирования уравнения по u с учетом частных значений показателей степенной зависимости $m = 0,5$ и $\chi = 1,5$ уравнение (9) принимает вид

$$a_j = \frac{2\pi K_c \sqrt{2\rho_g D_g} (V_k \pm V_u) n_g}{5V_u H_u^{3/2}} (t_f - y)^{5/2}. \quad (12)$$

где ρ_g – радиус округления при вершине зерна.

Тогда вероятность контакта абразивных зерен с обрабатываемым материалом определится как

$$P_k = P(\bar{M}) = \exp \left\{ - \frac{\pi K_c \sqrt{2\rho_g} (V_k \pm V_u) n_g}{V_u H_u^{3/2}} \times \left[\frac{2}{5} \sqrt{D_g} \sum_{i=2}^n (t_f - y_j - i\Delta r)^{5/2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{3}{8} (t_f - y_j - \Delta r)^2 \left(z - \frac{2z^3}{3L_y^2} + \frac{z^5}{5L_y^4} + \frac{8}{15} L_y \right) \right] \right\} \quad (13)$$

Обрабатываемый материал на уровне y_j будет удаляться только при выполнении тех контактов, для которых глубина микрорезания больше расстояния до уровня y_{j-i-1} , т.е. соблюдается условие $t_{f-i} \geq y_{j-i-1}$. Если $t_{f-i} < y_{j-i-1}$, то на наблюдаемом уровне материал не удаляется и слагаемое

$\sum_{i=2}^n (t_f - y_j - i\Delta r)^{5/2}$ при вычислениях уравнения (13) приравнивается к нулю. Величина Δr вычисляется по формуле

$$\Delta r = \frac{t_f^2 K_c \sqrt{D_g \rho_g} (V_k \pm V_u) n_g}{13,66V_u + 1,478K_c t_f \sqrt{D_g \rho_g} (V_k \pm V_u) n_g}.$$

На рисунке 4 приведены результаты расчетов вероятности контакта абразивных зерен с обрабатываемым материалом образцов (закаленная сталь диаметром 50 мм кругами из электрокорунда белого зернистостью 25 при скорости круга $V_k = 35 \text{ м/с}$, скорости детали $V_u = 0,25 \text{ м/с}$). Анализ вероятности контакта вершины абразивного зерна с материалом показывает, что для наиболее удаленного от центра круга зерна при движении от точки входа в зону к основной плоскости, проходящей через центр детали и центр шлифовального круга, наблюдается увеличение вероятности контакта. В основной плоскости она становится равной единице. При движении от основной плоскости к точке выхода вероятность снижается от единицы до нуля. Для зерен, расположенных на расстоянии u от условной наружной поверхности инструмента, кривые имеют более плавный характер, у них нет столь выраженного линейного участка в области основной плоскости, при всех значениях z вероятность меньше единицы.

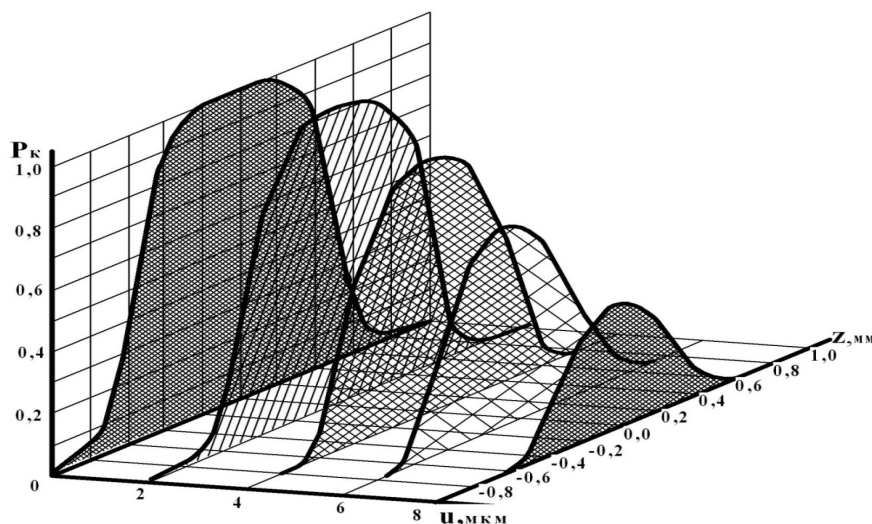


Рисунок 4 – Вероятность контакта вершины зерна с обрабатываемым материалом

Численное решение интеграла (6) по методу Симпсона получено на ПК для случая шлифования образцов из закаленной стали диаметром 50 мм кругами 1-300x20x127 24А 25-Н СМ2 Б. Скорость круга при расчетах была принята равной 35 м/с, скорость детали – 0,2 м/с. Результаты расчетов приведены на рисунке 5.

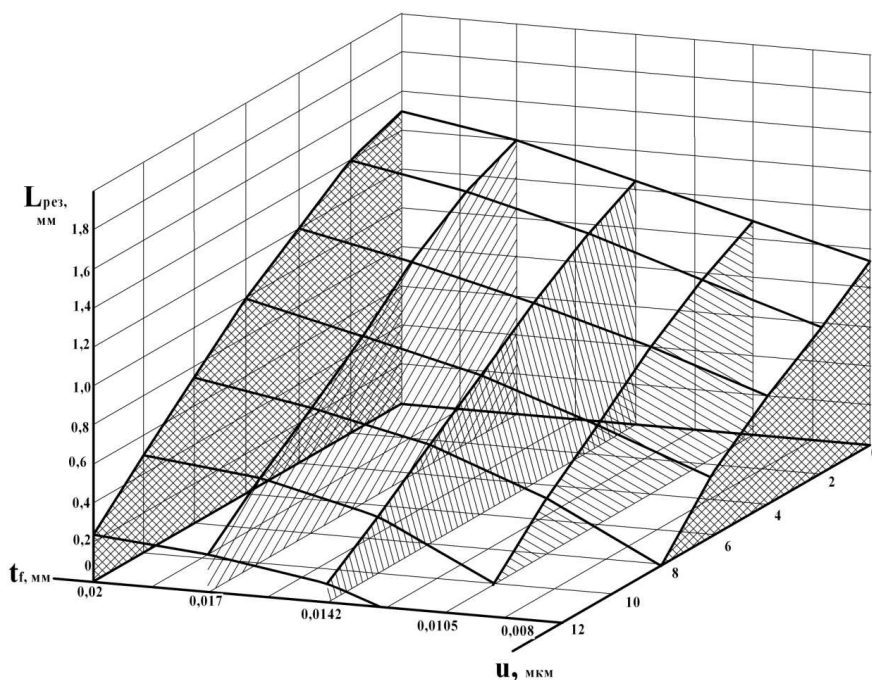


Рисунок 5 – Длина пути резания единичным абразивным зерном

Длина пути резания, с увеличением числа контактов поверхности инструмента с обрабатываемой деталью увеличивается. Кривые отображают динамику работы зерна в круге, начиная с момента его активизации. С увеличением глубины микрорезания абразивное зерно все дальше проникает в зону резания, увеличивается вероятность его контакта с обрабатываемым материалом и длина пути резания. Вершина зерна начинает более интенсивно изнашиваться, её продвижение по глубине замедляется. При дальнейшем увеличении времени работы инструмента размерный износ вершины зерна на i -м касании все более приближается к величине радиального износа круга, а приращение глубины микрорезания стремится к нулю. Цикл активной работы зерна заканчивается при его разрушении под действием сил и температур, возникающих при микрорезании.

Приведенная методика позволяет рассчитать особенности работы абразивного зерна в зоне контакта на примере круглого наружного шлифования. Для дальнейшего развития необходимо связать износ абразивного зерна с износом шлифовального круга.

Библиографический список использованной литературы:

1. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / Под ред. Резникова А.Н.. — М.: Машиностроение, 1977. — 391 с.
2. Худобин Л.В. Анализ геометрии абразивного зерна / Л.В. Худобин // Труды Ульяновского политехн. ин-та. — Ульяновск, 1966. — Вып. 1. — С. 19–27.
3. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. — Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1979. — 232 с
4. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. В 2 ч. Ч. 2. Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. — 160 с.

Поступила в редакцию 21.03.2012 г.

Богущий В.Б., Новоселов Ю.К. Знос абразивних зерен в крузі при шліфуванні заготовок

Аналізуються особливості роботи абразивного зерна в зоні контакту на прикладі круглого зовнішнього шліфування.

Ключові слова: абразивне зерно, мікрорезання, знос, ймовірність контакту, шлях різання.

Bogutsky V.B., Novoselov J.K. Wear of abrasive grains in the circle when grinding pieces

The features of the abrasive grains in the contact area on the example of a circular external grinding are analyzed.

Keywords: abrasive grain, micro cutting, wear and tear, the probability of contact, a way of cutting.