

УДК 621.9.025

**Е.А. Левченко, доцент, канд. техн. наук,  
Н.И. Покинтелица, профессор, д-р техн. наук,  
Ю.К. Новоселов, профессор, д-р техн. наук**

*Севастопольский национальный технический университет,  
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053  
tm@sevntu.com.ua*

## **РАСЧЕТ БОКОВОЙ РЕЖУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТРЕЗНОГО КРУГА С УЧЕТОМ ИЗНОСА АБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН**

*Приведены результаты теоретических исследований износа боковой рабочей поверхности отрезного круга, которые позволяют провести анализ формирования и причины изменения микрорельефа рабочей поверхности инструмента во время обработки в зависимости от режимов резания и его характеристики.*

**Ключевые слова:** *износ абразивных зерен, абразивная разрезка, фактическая длина резания, вероятность износа, микротвердость зерна, качество поверхности, прочность связи.*

**Введение.** Важнейшей задачей в теории абразивной разрезки является выявление закономерностей распределения режущих зерен на боковой рабочей поверхности отрезного круга и определение количества абразивных зерен, участвующих в отделении стружки в каждый момент времени. При этом необходимо учесть, что исходная рабочая поверхность круга в процессе разрезки подвергается износу и, соответственно, от степени износа меняет свои параметры [1].

Процесс абразивной разрезки представляет собой процесс механического взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого металла как процесс массового микрорезания металла абразивными зёрнами. В этом случае физико-механические свойства абразивных материалов в основном определяют их износ, а, следовательно, и стойкость отрезных кругов.

Анализ причин износа, включающий специфику физико-механических процессов, протекающих в зоне контакта абразивного зерна с разрезаемым материалом, дает возможность установить наличие нескольких обособленных режимов износа, выявить их характерные области распространения, а также возможные схемы перехода из одного режима в другой. Рабочая поверхность отрезного круга и ее профиль являются сложными и не постоянными, имеющими разновысотные зёрна, расположенные на различных расстояниях. В процессе разрезки вследствие изнашивания поверхности режущего инструмента, происходит изменение числа активных вершин, проходящих через зону контакта круга и заготовки. Это изменение происходит с каждым оборотом отрезного 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. Таким образом, изучение вероятности процесса износа отрезного круга оказывает огромное влияние на прогнозирование стойкости режущего инструмента и эффективность процесса разрезки в целом.

**Целью данной статьи** является изучение и анализ формирования боковой рабочей поверхности инструмента с учетом его износа в процессе обработки.

**Основное содержание работы.** Отображением стабильности абразивной разрезки и достижения требуемого качества разрезаемой поверхности является сохранение условия:

$$h_3 + t_{\phi} < H_{\text{связки}},$$

где  $h_3$  – величина износа абразивных зерен;  $t_{\phi}$  – фактическая глубина резания абразивным зерном;  $H_{\text{связки}}$  – величина выступания зерен из связки.

В стадии установившегося износа за  $i$ -й оборот круга величина износа на режущем зерне  $h_{3i}$  инструмента пропорциональна величине относительного износа  $h_0$  и фактической длине пути резания  $L_{\text{рези}}$ :

$$h_{3i} = h_0 \cdot L_{\text{рези}}, \quad (1)$$

где  $L_{\text{рези}}$  – фактическая длина пути резания единичными абразивными зёрнами.

$$L_{\text{рези}} = L_{ki} \cdot P_{ki}, \quad (2)$$

где  $P_{ki}$  – вероятность контакта вершины (для наиболее выступающего зерна  $P_k = 1$ );  $L_{ki}$  – длина контакта зерна с разрезаемой деталью при  $i$ -м обороте круга.

Согласно кинематической схеме резания (рисунок 1) общая длина контакта режущих зерен с разрезаемой деталью за один оборот круга равна длине дуги контакта инструмента и детали:

– при разрезке сплошного материала трубы:

$$L_{ki} = 2R\alpha_i ; \tag{3}$$

– при разрезке стенок трубы:

$$L_{ki} = 2R(\alpha_i - \alpha_{i1}) . \tag{4}$$

Фактическая длина пути резания  $L_{рез}$  за период

одного реза детали равна суммарному значению  $\sum_{i=1}^n L_{резi}$

за  $n$ -й оборот круга.  $L_{рез} = \sum_{j=1}^m L_{резj}$  за время работы

зерен, расположенных на боковой режущей поверхности круга.

Величина относительного износа  $h_0$  представляет собой износ вершины на единицу длины пути резания. Для вычисления износа режущих зерен  $h_{3i}$  необходимо определить функциональную связь относительного износа  $h_0$  с режимами обработки. Его значение зависит от марки инструментального материала, материала разрезаемой трубы.

Для этого использовалась известная из теории трения изнашивания зависимость [2]:

$$h_0 = K_n \frac{\sigma_H}{H} , \tag{5}$$

где  $K_n$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от материала взаимодействующих тел;  $\sigma_H$  – нормальное давление на поверхности контакта;  $H$  – микротвердость зерна.

Микротвердость зерна является функцией температуры, которая, в свою очередь, зависит от режимов обработки. В рабочем диапазоне температур эта функция представлена зависимостью вида:

$$H = A e^{-\mu \Theta_{max}} , \tag{6}$$

где  $\Theta_{max}$  – максимальная температура в зоне резания, °C;  $A, \mu$  – эмпирические коэффициенты.

Максимальная температура в зоне резания найдена по зависимости [3]:

$$\Theta_{max} = \frac{2 q_1 \sqrt{\varepsilon \cdot \tau_k}}{\lambda \sqrt{\pi}} , \tag{7}$$

где  $q_1 = \frac{a \cdot P_z \cdot V_k}{S_k}$  – интенсивность теплоподвода;  $a$  – коэффициент температуропроводности материала детали, м<sup>2</sup>/с;  $\varepsilon$  – коэффициент трения зерна о металл;  $V_k$  – скорость отрезного круга, м/с;  $P_z$  – тангенциальная составляющая общей силы резания, Н;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·°C);  $\tau_k$  – время контакта максимально выступающего зерна с металлом, с;  $S_k$  – площадь теплового источника, м<sup>2</sup>.

Выражения (5) и (6) подставлены в (4). Формула для определения относительного износа примет вид:

$$h_0 = K_n \sigma_H A \exp(-\mu \frac{2a \cdot P_z \cdot V_k}{S_k \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi}} \sqrt{\varepsilon \cdot \tau_k}) . \tag{8}$$

На основании приведенных выше результатов расчета износа круга и требований к инструменту и процессу абразивной резки, создан алгоритм, позволяющий определить характер изменения боковой режущей поверхности круга в зависимости от кинематических параметров взаимодействия инструмента и разрезаемой детали. При моделировании использовались программные продукты для статистической обработки данных Maple-12 и «MathCad 2000». Алгоритм представлен на рисунке 2.

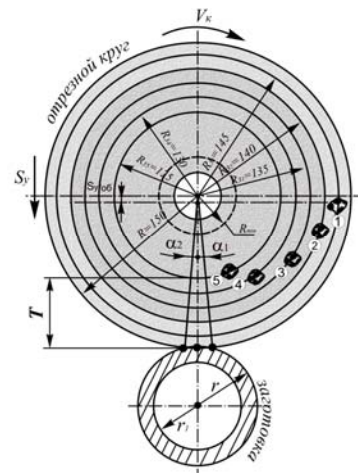


Рисунок 1 – Схема к расчету износа абразивных зерен по радиусу круга

Алгоритм дает возможность рассчитать износ абразивного зерна за каждый оборот круга с учетом изменения длины его контакта с разрезаемой деталью.

Для определения износа круга исходными данными являются параметры нормального распределения прочности зерен и нагрузки изнашивания рабочей поверхности.

Расчет производится в несколько циклов, равных заданному числу оборотов круга и количеству обрабатываемых деталей.

При принятом значении вероятности контакта  $P_k$  по зависимостям (3, 4) определяется фактическая длина дуги контакта режущих зерен с разрезаемой деталью за один оборот круга.

Вычисления продолжают до тех пор, пока не будут рассмотрены все обороты круга. Затем выполняется аналогичный расчет для обработки следующей детали.

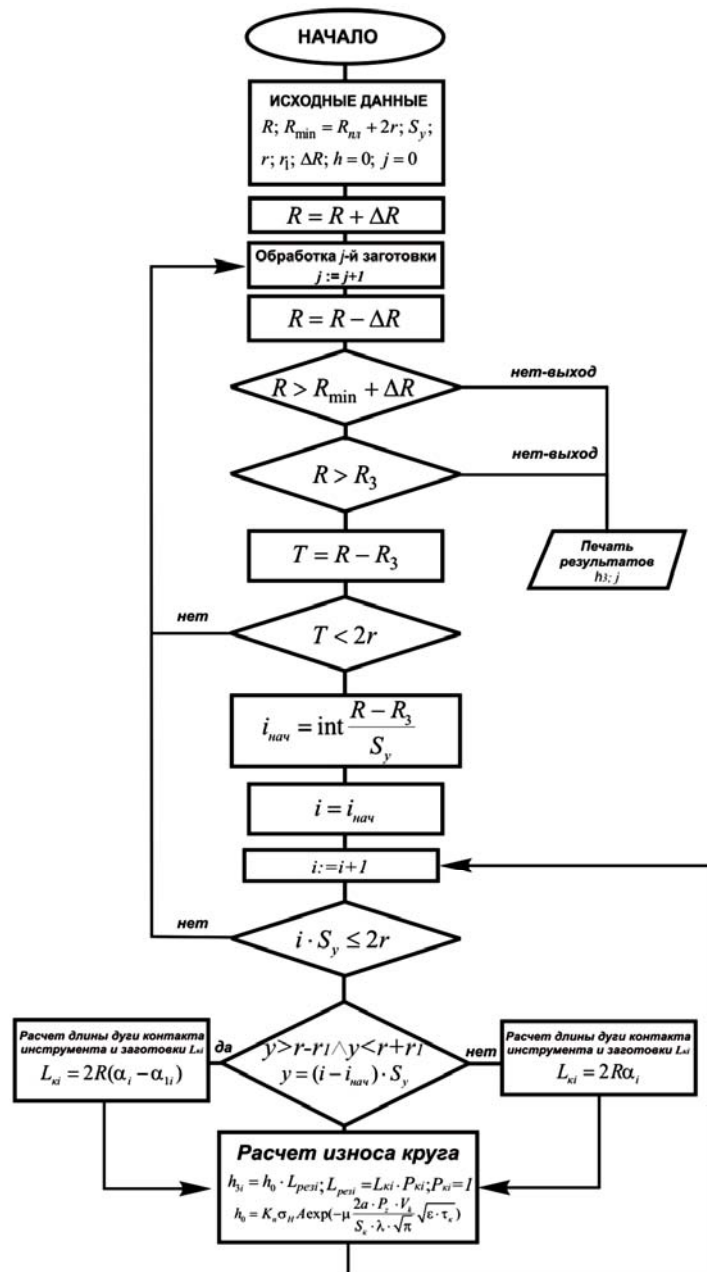


Рисунок 2 – Алгоритм расчета износа зерен боковых режущих поверхностей круга

В таблице 1 представлены результаты расчета износа зерна, расположенного на различных значениях радиуса боковой поверхности отрезного круга со следующими исходными данными: труба – диаметр наружный – 26,9 мм, толщина стенки трубы – 2,0 мм; отрезной круг – 300×3×32,

63C24P5BF1C80, радиальная подача круга –  $S_y = 8$  мм/с,  $t_{\phi} = 2t = 0,0208$  мм,  $h_0 = 4,68 \cdot 10^{-8}$  мм, радиальный износ круга  $\Delta R = 0,07$  мм (обработка одной детали).

Таблица 1 – Результаты расчета износа зерен, расположенных на пяти радиусах боковой режущей поверхности круга

| Кол-во оборотов круга | Радиус расположения зерна на боковой режущей поверхности круга, $R_3$ , мм |                    |                    |                    |                    |
|-----------------------|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                       | 145  | 140                | 135                | 130                | 125                |
|                       | Износ зерна $h_3$ , мкм  |                    |                    |                    |                    |
| 50                    | 0,0183   | –                  | –                  | –                  | –                  |
| 100                   | 0,0286   | 0,0184             | –                  | –                  | –                  |
| 150                   | 0,0383   | 0,0246             | 0,0183             | –                  | –                  |
| 200                   | 0,0484   | 0,0384             | 0,0245             | 0,0182             | –                  |
| 250                   | 0,0648   | 0,0483             | 0,0385             | 0,0285             | 0,0182             |
| 268                   | 0,0740   | 0,0527             | 0,0421             | 0,0323             | 0,0224             |
| $\sum h_3$            | $\sum h_3 = 0,272$   | $\sum h_3 = 0,182$ | $\sum h_3 = 0,123$ | $\sum h_3 = 0,079$ | $\sum h_3 = 0,040$ |
| $h_3 + t_{\phi}$      | 21,07  | 20,98              | 20,92              | 20,88              | 20,84              |

Графики зависимости  $h_3 = f(n)$ ,  $t_{\phi} + h_3 = f(R_3)$  при обработке трубы диаметром 26,9 мм представлены на рисунках 3, 4 и  $h_3 = f(n)$  при обработке нескольких труб рисунке 5. Результаты расчета износа инструмента, а также область определения допустимых значений работы торцевой поверхности круга при разрезке трех различных диаметров труб изображены на рисунках 6 и 7.

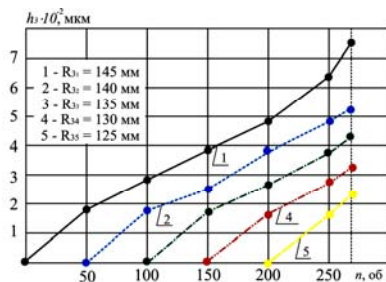


Рисунок 3 – Износ зерна, расположенного на пяти различных радиусах боковой поверхности отрезного круга  $h_3$  в зависимости от числа оборотов круга при разрезке трубы диаметром 26,9 мм

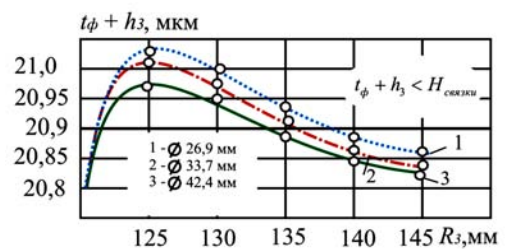


Рисунок 4 – Зависимость суммарного значения глубины микрорезания и величины износа режущего зерна  $h_3 + t_{\phi}$ , расположенного на различных значениях радиусов боковой поверхности отрезного круга при разрезке труб 3-х диаметров

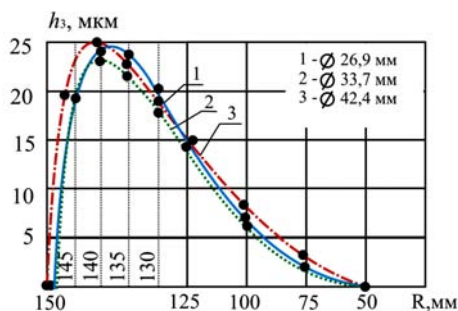


Рисунок 5 – Изменение рельефа боковой поверхности круга с учетом износа зерна  $h_3$  при разрезке труб трех диаметров

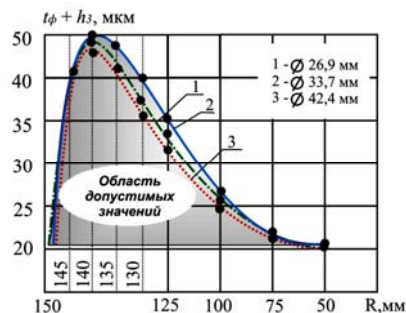


Рисунок 6 – Область допустимых значений работы зерна, расположенного на различных радиусах торцевой поверхности круга с учетом износа  $h_3$  и глубины микрорезания  $t_\phi$

- A** - полный цикл работы зерна, расположенного на радиусе  $R=145$  мм, до выпадения с учетом радиального износа периферии круга (разрезка 72 деталей)
- B** - " -  $R=140$  мм (разрезка 143 деталей)
- C** - " -  $R=135$  мм (разрезка 215 деталей)
- D** - " -  $R=130$  мм (разрезка 286 деталей)
- E** - " -  $R=125$  мм (разрезка 354 деталей)

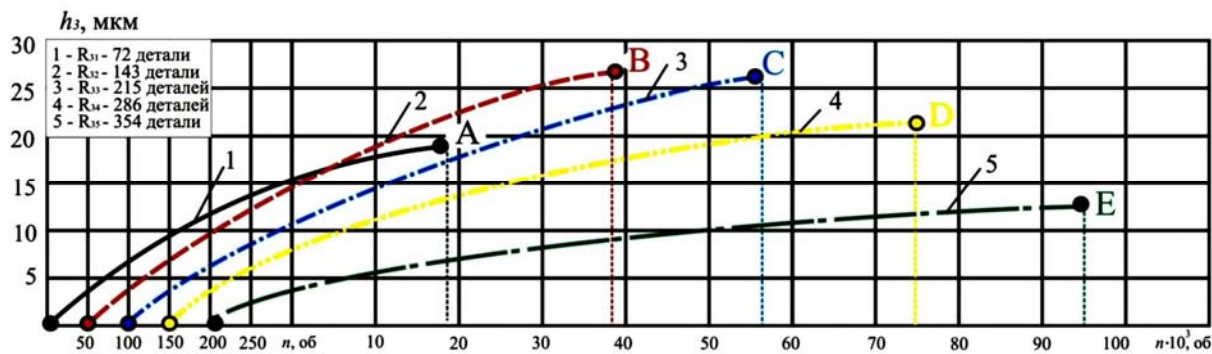


Рисунок 7 – Цикл работы абразивных зерен, расположенных на пяти различных радиусах боковой поверхности отрезного круга  $h_3$  в зависимости от числа оборотов  $n$  инструмента до выпадения с учетом радиального износа периферии круга при разрезке труб диаметром 26,9 мм

Разрушение режущей кромки происходит либо в случае превышения силы резания этой кромкой предела прочности материала зерна, либо при превышении предела прочности связки, удерживающей зерно, с работающей кромкой.

В общем случае не исключена возможность вырывания зерна в составе блока зерен, скалывание части зерна по тем же причинам или под воздействием удара о вырванное зерно или его осколок. Будем считать, что вероятность возникновения таких событий ничтожно мала.

В общем случае зерно может в начальный период взаимодействия с разрезаемым материалом изнашиваться по длине дуги контакта, под действием силы резания сколоться на некоторую величину или покинуть рабочую поверхность круга в результате вырывания из связки [4].

Представим вероятность контакта наиболее выступающего зерна с разрезаемым материалом как соответствующее событие, т.е.  $P_k = 1$ .

Для расчета вероятности вырывания зерна из связки необходимо знать значение силы  $P_{рез}$ , при которой происходит вырывание зерна. Если допустить, что  $P_{рез}$  определяется только прочностью связки можно, исходя из её прочности, количества мостиков и их размеров, рассчитать среднее значение  $\bar{P}_{рез}$ . Поскольку нас интересуют только зерна, находящиеся на поверхности инструмента, возникают большие трудности в определении действительного количества мостиков связки и их реальных размеров. Необходимо так же учитывать, что не всегда причиной удаления зерна является разрушение мостиков связки. Большое разнообразие формы зерен, дефекты структуры абразивного материала вызывают не меньшие проблемы и при расчете силы разрушения  $P_{рез}$  вершины зерна.

Обозначим вырывание зерен из связки при бесконечной прочности материала зерен за событие  $\alpha$ . Очевидно, что зерна вырываются из связки в том случае, если равнодействующая сила резания  $P_{рез}$ , превышает силу закрепления зерен в связке  $R_3$ .

Запишем это условие в виде:

$$P(\alpha) = P(R_3 < P_{рез}), \tag{9}$$

Выделим на кривой  $f(P_{рез})$  элементарный участок  $dP_{рез}$  (рисунок 8). Вероятность события, что случайно выбранное зерно уровня  $u$  на  $i$ -м обороте круга будет закреплено в связке силой в диапазоне от  $P_{рез}$  до  $P_{рез} + dP_{рез}$ , определяется по формуле:

$$P_k(dP_{рез}) = f(P_{рез})dP_{рез}. \tag{10}$$

Вероятность события  $\alpha$  вычисляется интегралом:

$$P(\alpha) = P(P_{рез}) \cdot \int_{R_3 + P_{рез}}^{\infty} f(P_{рез})dR_3. \tag{11}$$

Вероятность события  $\alpha$  для зерен на некотором  $i$ -м обороте круга, определяется выражением:

$$P(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} f(P_{рез}) \int_{P_{рез}}^{\infty} f(R_3)dR_3dP_{рез}. \tag{12}$$

На  $(i+1)$ -м обороте круга в связи с тем, что на предшествующем обороте вырываются наиболее слабо закрепленные зерна (левый участок кривой  $f(P_{рез})$  на рисунке 8), закон распределения прочности закрепления зерен в связке круга изменится (пунктирная кривая (рисунок 8)). Для проведения дальнейших вычислений необходимо провести коррекцию закона распределения:

$$f_{i+1}^*(P_{рез}) = f_k(P_{рез})[1 - P^*(\alpha)]. \tag{13}$$

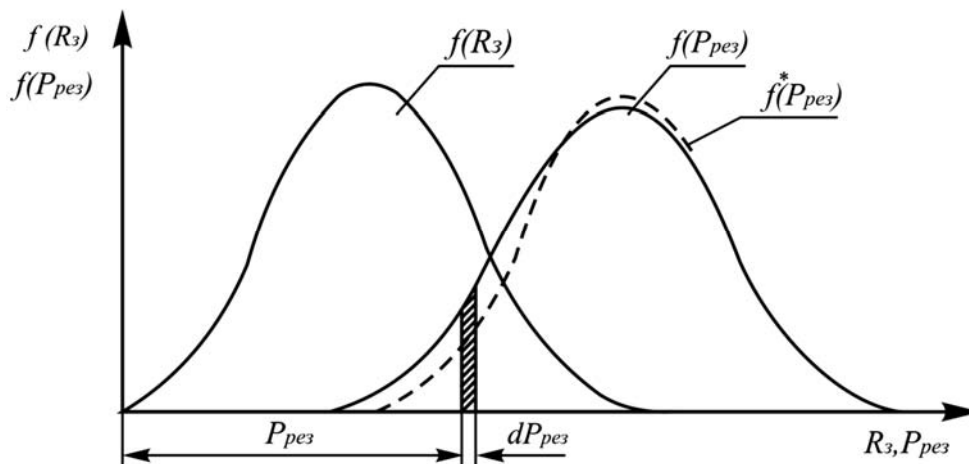


Рисунок 8 – Схема к расчету вероятности вырывания абразивных зерен из связки инструмента при абразивной резрезке

Плотность вероятностей, определяемая (13), не нормирована, т. е. интеграл от плотности будет меньше единицы. Необходимо произвести нормирование закона распределения:

$$f_{i+1}(P_{рез}) = \frac{f_i(P_{рез})[1 - P_i^*(\alpha)]}{\int_{-\infty}^{\infty} f_i(P_{рез})[1 - P_i^*(\alpha)]dP_{рез}}. \tag{14}$$

При выполнении  $i$ -го оборота вследствие износа абразивного инструмента и усталостных процессов в материале связки, механо-химического взаимодействия её с внешней средой может измениться прочность связки и условия закрепления зерен. По тем же причинам может измениться и прочность зерен. Это приведет к дополнительным изменениям параметров кривых  $f(P_{рез})$  и  $f(R_3)$ .

Таким образом, законы распределения  $f(P_{рез})$  и  $f(R_3)$  в общем случае являются функциями времени или числа контактов зерен круга с разрезаемым материалом.

**Выводы.** На основании полученных аналитических зависимостей изменения микрорельефа боковых поверхностей круга с учетом его износа разработан алгоритм, позволяющий определить характер изменения геометрических параметров отрезного круга в процессе резки. Как показывает анализ исследований, прочность закрепления единичных абразивных зерен  $R_3$  не одинакова и является величиной случайной, имеющей плотность, близкую к закону нормального распределения. Полученные результаты расчета износа боковых режущих поверхностей круга позволяют качественно описать причины изменения шероховатости обработанной поверхности во время обработки в зависимости от рода факторов (с учетом изменения числа зерен при износе режущего инструмента).

**Библиографический список использованной литературы:**

1. Новосёлов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. — Севастополь: СевНТУ, 2012. — 304 с.
2. Богомолов Н.И. О работе трения в абразивных процессах / Н.И. Богомолов. — Труды ВНИИАШ. — М.–Л.: Машиностроение, 1965. — № 1. — С. 72–78.
3. Маслов Е.И. Теория шлифования материалов / Е.И. Маслов. — М.: Машиностроение, 1974. — 320 с.
4. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование / Л.Н. Филимонов. — Л.: Машиностроение, 1979. — 248 с.

*Поступила в редакцию 24.01.2014 г.*

**Левченко О.О., Покінтелиця М.І., Новосьолов Ю.К. Розрахунок бічної різальної поверхні відрізного круга з урахуванням зносу абразивних зерен**

Наведені результати теоретичних досліджень зносу бічної робочої поверхні відрізного круга, які дозволяють провести аналіз формування та причини зміни микрорельєфу робочої поверхні інструменту під час обробки в залежності від режимів різання і його характеристики.

**Ключові слова:** знос абразивних зерен, абразивна розрізка, фактична довжина різання, ймовірність зносу, мікротвердість зерна, якість поверхні, міцність зв'язки.

**Levchenko E.A., Pokintelitsa N.I., Novoselov Yu.K. Calculation of lateral cutting surface cutting discs adjusted for depreciation of abrasive grains**

The results of theoretical research work surface wear side cutting wheel that allow the analysis of the formation and the reasons for changes in microrelief tool working surface during processing, depending on the cutting conditions and its characteristics.

**Keywords:** wear of abrasive grains, abrasive cutting, the actual cutting length, the probability of wear, microhardness grain, surface quality, durability ligament.