

УДК 621.93

**В.В. Гусев, профессор, д-р техн. наук,****А.Л. Медведев, ассистент***ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»,**Ул. Артема, 58, г. Донецк, Украина, 83000**donntu-stanki@mail.ru***ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВОБОДНОГО АБРАЗИВА СО СВЯЗКОЙ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА ПРИ УПРАВЛЕНИИ СОСТОЯНИЕМ ЕГО РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

*Разработана математическая модель процесса взаимодействия свободного абразива с поверхностями алмазного шлифовального круга и притира, которая описывает закономерности процесса износа связки круга как динамического процесса изменения зазора между связкой шлифовального круга и притиром в зависимости от свойств, размера зерен свободного абразива, скоростей подачи абразивного материала и притира при правке.*

**Ключевые слова:** *свободный абразив, алмазный шлифовальный круг, притир, параметры управляющих воздействий, износ рабочей поверхности алмазного шлифовального круга.*

**Введение.** При обработке технической керамики, несмотря на использование в качестве режущего инструмента алмазных шлифовальных кругов, вследствие ограниченной саморегуляции [1] режущей способности рабочей поверхности инструмента, возрастает сила резания, что оказывает негативное влияние на качество поверхностного слоя изделия. Для управления параметрами рабочей поверхности круга (РПК) используются различные способы управляющих воздействий, основанные на использовании различных механизмов: механических, физических, химических или их комбинаций. Периодическое или непрерывное воздействие на РПК позволяет снизить силу резания и скорректировать геометрию инструмента. Наибольшим быстродействием на коррекцию состояния РПК обладают механические способы, к которым относится недостаточно изученный способ воздействия свободным абразивом [2].

**Целью данной статьи** является теоретический анализ процессов, происходящих на рабочей поверхности алмазного шлифовального круга (ШК), при использовании управляющих воздействий свободного абразива для восстановления его режущей способности.

**Основное содержание статьи.** Процесс управляющих воздействий свободного абразива – можно представить как процессы абразивного износа связки ШК и притира. Схема процесса представлена на рисунке 1. В притире имеется отверстие, через которое подается связанный цементом абразив (объемной долей абразива 70%) со скоростью  $V_{абр}$ . В качестве абразива используется карбид кремния зеленый различной зернистости F100..F46 в зависимости от зернистости круга. Одновременно, в радиальном по отношению к РПК направлении, со скоростью  $V_{пр}$  подается притир, изготовленный из чугуна серого СЧ-20 (твердость Бринеллю  $HB_{пр} = 200$  МПа). Алмазный шлифовальный круг вращается, линейная скоростью на периферии –  $V_k$ . Брусok с зернами абразива, связанных цементом (прочность на сжатие абразивного бруска  $\sigma_6 = 3 \pm 1$  МПа), разрушается под воздействием алмазных зерен круга. Незакрепленные абразивные зерна попадают в зазор между ШК и притиром.

Процесс правки – процесс динамического изменения текущего зазора  $H(\tau)$  между притиром и ШК во времени ( $\tau$ ). От величины зазора  $H(\tau)$  зависит, происходит ли в данный промежуток времени правка ШК или нет. Текущее значение величины зазора между поверхностью связки ШК и поверхностью впадин притира при скорости продольного перемещения притира  $V_{пр}$  и скоростях износа круга  $V_{ШК}^u(\tau)$  и притира  $V_{пр}^u$  имеет следующий вид

$$H(\tau) = H_0 - V_{пр} \cdot \tau + \int_0^{\tau} V_{пр}^u(\tau) \cdot d\tau + \int_0^{\tau} V_{ШК}^u(\tau) \cdot d\tau + \frac{N(\tau)}{j}, \quad (1)$$

где  $H_0$  – начальный зазор между поверхностью связки круга и впадинами микрорельефа поверхности притира,  $N(\tau)$  – текущее значение нормальной составляющей силы взаимодействия зерен свободного абразива с поверхностями притира и ШК,  $j$  – жесткость подсистемы ШК – притир.

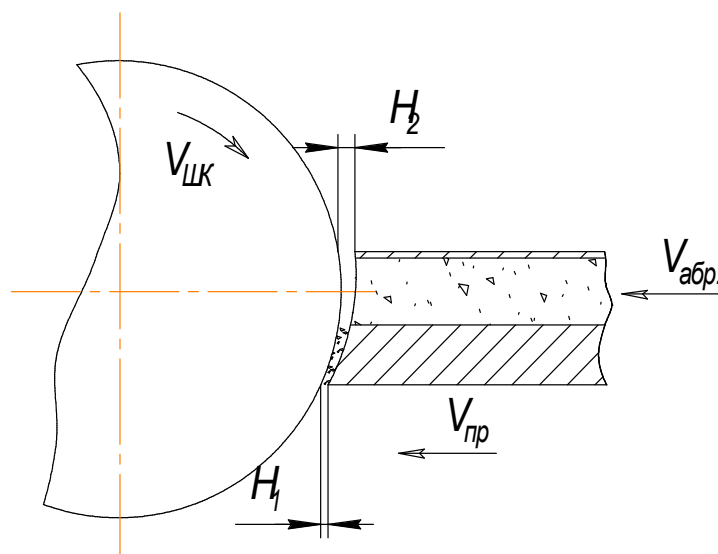


Рисунок – 1. Схематическое изображение процесса правки,  $H_2$ ,  $H_1$  – величины зазора между шлифовальным кругом и притиром в месте начала взаимодействия свободного абразива с притиром и ШК и окончания, соответственно

Начальный зазор  $H_0$  назначается исходя из условия величины большей, чем максимальный размер зерен  $d_{з \max}$  свободного абразива  $H_0 \geq d_{з \max}$ .

В этом случае минимальное расстояние от окружности, описываемой наиболее выступающими на круге алмазными зёрнами и поверхностью притира  $H_1$  (рисунок 1)

может быть определен из условия

$$H_1 = H_0 - \Delta R_{исх} - R_{зпр}, \quad (2)$$

где  $\Delta R_{исх}$  – максимальная величина выступания зерен из связки зазор,  $R_{зпр}$  – высота микронеровностей притира

При разработке математической модели процесса взаимодействия свободного абразива со ШК и притиром

были приняты следующие допущения:

1. При износе материалов связки и притира не учитываем фрикционную усталость металла (связки и притира), весь процесс удаления материала с них происходит за счет микрорезания;
2. Разрушение зерен свободного абразива в зоне контакта происходит при достижении напряжений в них предела прочности на сжатие;
3. Плотность вероятности распределения размера зерен свободного абразива подчиняется нормальному закону;
4. Твердость связки круга М2-01  $HB_{сб} = 174$  МПа.

На износ притира оказывают влияние два процесса. Первый связан с вышлифовыванием поверхности притира зёрнами свободного абразива, которые, притормаживаясь у поверхности круга и шаржируясь, производят процессы пластического деформирования и микрорезания рабочей поверхности притира. Экспериментальные исследования рабочего профиля притира [3], которые осуществлялись путем его профилографирования через каждые 2мм, показали, что на поверхности притира в начальный период его работы формируется стабильный профиль в виде желоба. В желобе удерживается свободный абразив при подаче его в зону правки. Максимальная глубина желоба достигает 40 мкм у отверстия для подачи абразива. Данный профиль можно представить как клиновидный зазор [3] с приведенным радиусом кривизны  $\rho = R_K \cdot R_2 / (R_2 - R_K)$ , где  $R_K$  – радиус круга,  $R_2$  – радиус рабочей поверхности притира. Величина угла клина составляет  $1,5 \pm 0,5$  градуса.

На рабочей поверхности притира видны следы шаржирования зерен свободного абразива в поверхность притира, в результате чего возможен процесс микрорезания ими связки ШК. Долю зерен, которые шаржировались в поверхность притира, будем учитывать коэффициентом  $p$ .

Второй процесс связан со шлифованием поверхности притира зёрнами ШК. Они формируют радиусную поверхность на торцевой поверхности притира, при взаимодействии с которой зерна свободного абразива и их осколки после работы покидают зону правки. Изменение этой радиусной поверхности будем оценивать при рассмотрении изменения текущего значения зазора  $H(\tau)$ . Скорость износа притира будет в этом случае оцениваться величиной удаления его поверхности зёрнами ШК. Условие касания зерен поверхности притира определяется неравенством  $H(\tau) \leq \Delta R(\tau) + R_{зпр}$ , где  $\Delta R(\tau)$  – текущее выступание зерен из связки. Скорость износа притира в этом случае равна величине скорости его подачи к ШК  $V_{np}^u(\tau) = V_{np}$ .

Процесс взаимодействия абразивных частиц со ШК и притиром начинается тогда, когда величина зазора будет меньше максимального размера зерна свободного абразива  $d_{з \max}$ , подаваемого в зону контакта, т.е. при  $H(\tau) < d_{з \max}$ . Вероятность участия зерна в деформации или удалении материала

связки ШК или притира можно определить, исходя из плотности вероятности распределения зерен и величины  $H(\tau)$ .

Вероятность участия зерна в процессе взаимодействия  $P_k(\tau)$  при нормальном законе распределения зерен свободного абразива по размеру можно определить по следующей зависимости:

$$P_k(\tau) = \begin{cases} 0, H(\tau) > \bar{d}_3 + 3\sigma \\ 0,5 + \Phi\left(\frac{H(\tau) - \bar{d}_3}{\sigma}\right), \bar{d}_3 < H(\tau) \leq \bar{d}_3 + 3\sigma \\ 0,5 - \Phi\left(\frac{\bar{d}_3 - H(\tau)}{\sigma}\right), \bar{d}_3 - 3\sigma < H(\tau) \leq \bar{d}_3 \\ 1, H(\tau) < \bar{d}_3 - 3\sigma \end{cases}, \quad (3)$$

где  $\bar{d}_3$  – средний размер зерна свободного абразива, а  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение его размера.

Физика процесса износа связки ШК зернами свободного абразива сходна с физикой процесса износа трущихся поверхностей, в зазоре которых находятся абразивные частицы [4]. Важная особенность абразивного износа заключается в том, что задачу оценки износа можно свести к определению действия, производимого одной частицей (механика частицы), и суммированию этих независимых повреждений (статистика частицы).

Двигаясь в зазоре сопряжения со все возрастающим внедрением в материалы сопряженных поверхностей, абразивная частица деформирует некоторый объем материалов поверхностей упруго, пластически, а затем производя микрорезание. При этом зерна свободного абразива, испытывая сжатие, разрушаются. Средний размер зерен после правки, как показали эксперименты, уменьшается [5]. Закон распределения зерен по размерам изменился от нормального к гамма распределению. Долю абразива, участвующего во взаимодействии, будем рассчитывать из условий, при которых зерно вызывает пластическую деформацию или микрорезание в материалах связки ШК и притира.

Для суммирования повреждений, производимых каждой абразивной частицей, необходимо оценить число частиц, попадающих на ШК. Общий объем абразива, попадающего в единицу времени в зазор между притиром и кругом, определится произведением площади сечения абразивного бруска  $A_{абр}$  на скорость его подачи  $V_{абр}$  и числа зерен  $n_a$  в единице объема абразивного бруска. Учитывая вероятность участия зерна в процессе взаимодействия  $P_k(\tau)$  (3), определяем число зерен  $n_{абр}$ , попадающих в зону контакта и участвующих в удалении материалов связки и притира  $n_{абр} = V_{абр} \cdot A_{абр} \cdot n_a \cdot P_k(\tau)$ .

Линейный износ связки круга  $\Delta h_{I_{св}}$  и притира  $\Delta h_{I_{пр}}$ , производимый абразивными зернами к моменту их дробления можно определить по соответствующим зависимостям [4]:

$$\Delta h_{I_{св}} = \frac{\sigma_{аб}^{2,5} r^{2,5} \sqrt{\rho} \cdot n_{абр} \cdot p \cdot \alpha}{12 \cdot HB_{св}^{1,5} \cdot HB_{пр} \cdot A_{св}}; \quad \Delta h_{I_{пр}} = \frac{\sigma_{аб}^{2,5} r^{2,5} \sqrt{\rho} \cdot n_{абр} \cdot p \cdot \beta}{12 \cdot HB_{пр}^{1,5} \cdot HB_{св} \cdot A_{пр}},$$

где  $A_{св}, A_{пр}$  – соответственно, площади поверхности круга и притира,  $r$  – средний размер зерна свободного абразива,  $p$  – вероятность шаржирования зерен абразива,  $\beta = HB_{св} / (HB_{св} + HB_{пр})$ ,  $\alpha = HB_{пр} / (HB_{св} + HB_{пр})$  – соответственно, средние вероятности закрепления абразивных частиц на поверхностях связки круга и притира.

При разрушении зерен между притиром и поверхностью связки возникает сила, которая может быть рассчитана из условия прочности зерна на сжатие  $\sigma$ , числа зерен между притиром и ШК  $n_{абр}$  по следующей зависимости

$$N(\tau) = n_{абр} \cdot P_k(\tau) \cdot \sigma. \quad (4)$$

Выступление вершин алмазных зерен из связки ( $\Delta R(\tau)$ ) определяется двумя процессами: скоростями линейного износа по вершинам алмазных зерен  $V_L(\tau)$  (вследствие раскалывания или

удаления зерен с поверхности ШК в результате взаимодействия с материалом притира) и износа связки ШК  $V_{\Delta R}(\tau)$ .

Износ ШК по вершинам зерен происходит при контакте вершин зерен алмазного круга с поверхностью притира. Величина линейного износа круга может определяться по обычным зависимостям, принятым в теории резания [5], в зависимости от объема  $Q$  материала притира, удаленного кругом в единицу времени

$$L_k(\tau) = \int_0^{\tau} V_L(\tau) \cdot d\tau = \int_0^{\tau} C \cdot Q^m \cdot d\tau, \quad (5)$$

где  $C$  и  $m$  – постоянные, зависящие от физико-механических свойств материала притира и определяемые экспериментально.

Влияние на изменение зазора оказывает постоянное изменение максимального выступания зерна из связки  $\Delta R(\tau)$

$$\Delta R(\tau) = \Delta R_0 - \int_0^{\tau} V_L(\tau) d\tau + \int_0^{\tau} V_{\Delta R}(\tau) d\tau. \quad (6)$$

С использованием разработанной математической модели процессов, происходящих на рабочей поверхности алмазного шлифовального круга (ШК) и притира под действием свободного абразива разработана программа в среде MathCAD. Она позволила промоделировать скорости износа связки ШК и материала притира под воздействием свободного абразива при изменении входных параметров процесса правки.

Проверку адекватности разработанной модели износа алмазного шлифовального круга осуществим по результатам замера изменения максимального выступания  $\Delta R(\tau)$  алмазных зерен на РПК от времени воздействия на нее зернами свободного абразива. Результаты приведены на рисунке 2, на котором экспериментальные значения представлены точками, расчетные значения кривой. Расчетные значения  $\Delta R(\tau)$  отличаются от экспериментальных величин не более чем на 8%. При воздействии на РПК свободного абразива различной зернистости величина  $\Delta R(\tau)$  к 500 с воздействия представлена на рисунке 3. Здесь мы также наблюдаем хорошее совпадение экспериментальных значений с расчетными величинами. С увеличением зернистости наблюдается практически линейное увеличение максимального выступания алмазных зерен на РПК.

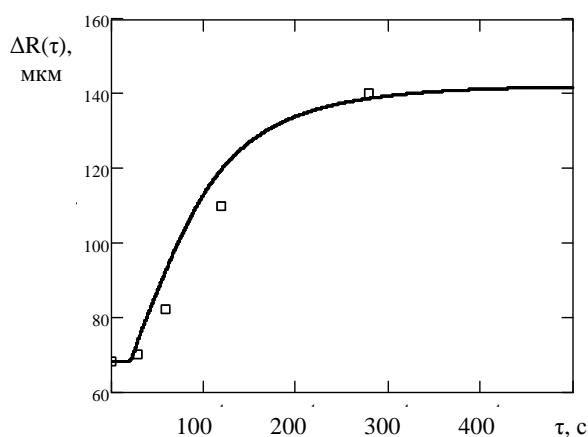


Рисунок – 2. Изменение максимального расстояния от вершин зерен до связки  $\Delta R(\tau)$  на круге 1A1 200x10x5x76 AC32 – 4-M201 от времени  $\tau$  воздействия свободного абразива F54 на РПК

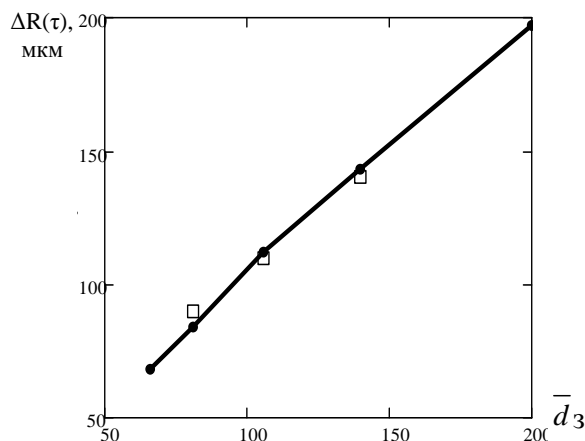


Рисунок – 3. Влияние среднего размера зерна свободного абразива на максимальное расстояние от вершин зерен до связки  $\Delta R(\tau)$ , на круге 1A1 200x10x5x76 AC32 – 4-M201 после 500 с его воздействия на РПК

В исходном состоянии величина зазора между притиром и ШК выбирался из условия ее превышения наибольшего зерна свободного абразива. Как показали результаты моделирования, представленные на рисунке 4, зазор вначале уменьшается со скоростью перемещения притира до того

момента, когда он станет равным размеру зерен абразива (в нашем случае к 15 с), которые, шаржируясь в притир начинают вышлифовывать связку ШК.

С уменьшением зазора все большее число абразивных зерен участвует в работе в единицу времени (рисунок 5). Скорость уменьшения зазора замедляется. Минимальный зазор соответствует наибольшему числу абразивных зерен, разрушающихся в зоне правки. В дальнейшем наблюдаем постепенное увеличение зазора между связкой и поверхностью притира к 200...250 с правки. После этого рост зазора замедляется. Число зерен, разрушающееся при правке, также стабилизируется к этому моменту времени.

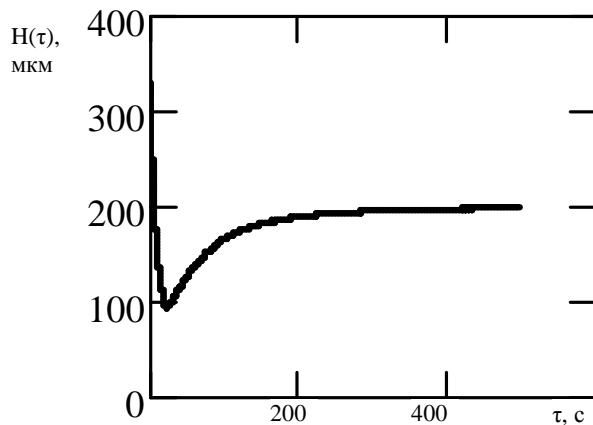


Рисунок – 4. Изменение зазора между притиром и связкой алмазного круга 1А1 200×10×5×76 АС32 – 4-М201 от времени воздействия свободного абразива F54

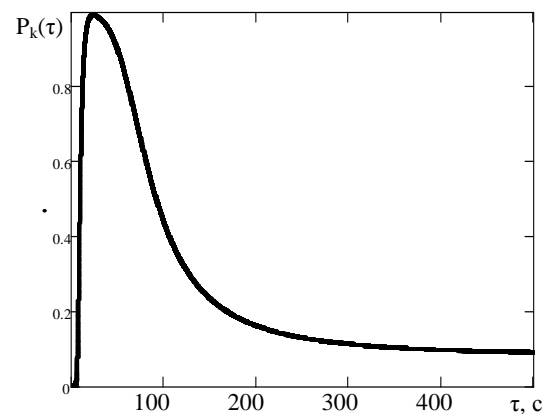


Рисунок – 5. Изменение вероятности участия зерен свободного абразива F54 в удалении связки алмазного круга 1А1 200×10×5×76 АС32 – 4-М201 от времени управляющих воздействий

Износ связки ШК происходит вначале более интенсивно, при этом вероятность работы зерен свободного абразива наивысшая. Затем скорость износа связки после 250 с правки замедляется и в дальнейшем происходит с постоянной скоростью (рисунок 4).

Алмазные зерна ШК контактируют с притиром, сошлифовывая его с постоянной скоростью. Что приводит к линейному износу круга по вершинам зерен вследствие износа и удаления наиболее выступающих из них путем дробления и вырыва их из связки. В результате происходит уменьшение интенсивности роста развитости рельефа РПК по высоте  $\Delta R(\tau)$  после 200 с правки почти в 4 раза.

С увеличением скорости подачи абразива (объема абразива, подаваемого в единицу времени) в зазор между притиром и ШК величина выступания зерен из связки нелинейно возрастает (рис.6). На рисунке показаны два графика выступания зерен из связки в зависимости от скорости подачи абразива при различной длительности процесса правки 200 с и 500 с. При меньших скоростях подачи абразива увеличение длительности правки приводит к большему повышению выступания алмазных зерен из связки.

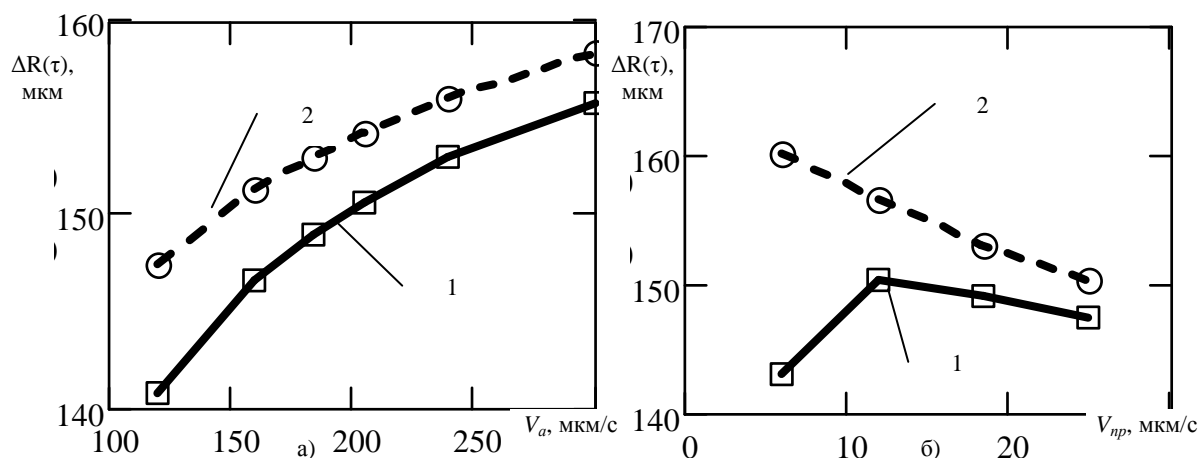


Рисунок – 6. Влияние скоростей подачи абразива  $V_a$  и притира  $V_{np}$  на максимальное расстояние от вершины зерен до связки  $\Delta R(\tau)$  на круге 1А1 200×10×5×76 АС32 – 4-М201 после а) 200 с воздействия свободного абразива на РПК и б) 500 с воздействия свободного абразива на РПК

В связи с нелинейной зависимостью выступления зерен из связки и различной интенсивностью удаления связки ШК от скоростей подачи абразива и притира следует ожидать их нелинейное влияние на режущую способность алмазного круга после управляющих воздействий на него свободного абразива.

**Выводы.** Полученные результаты показали, что разработанная математическая модель взаимодействия в системе алмазный шлифовальный круг – свободный абразив – притир и программа ее реализующая позволяет оценить влияние входных параметров процесса правки (зернистости свободного абразива, скоростей подачи абразива и притира) на интенсивность удаления связки ШК и максимальное выступание зерен из связки круга. Проверка разработанной математической модели на адекватность показала, что она описывает закономерности процесса износа связки круга с погрешностью, не превышающей 10%, что достаточно для инженерных моделей.

Моделирование износа металлической связки ШК при воздействии на него свободного абразива показало, что скорость ее износа зависит от таких параметров управляющих воздействий как размер зерна свободного абразива, скоростей подачи абразивного материала и притира. За счет выбора параметров управляющих воздействий свободного абразива на рабочую поверхность алмазного круга можно управлять скоростью износа связки круга и тем самым оказывать влияние на интенсивность восстановления режущих свойств круга.

**Перспективы дальнейших исследований в данной области.** Необходимо установить связь между величиной максимального вылета зерен из связки после правки и режущей способностью алмазного шлифовального круга.

#### **Бibliографический список использованной литературы.**

1. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов/ А.К. Байкалов — Киев: Наукова думка, 1978. — 207 с.
2. А.с. 1839393 СССР МКИ В 24 В 53/50. Способ правки абразивного инструмента / В.В. Бурмистров, А.В. Байков, А.Н. Емельянов, Л.П. Калафатова, А.Д. Хроменко (СССР). — № 4765299. Заявлено 14.12.89; Оpubл. 30.12.93, Бюл. № 47-48. 2 с.
3. Медведев А.Л. Износ поверхности притира и шлифовального круга при правке способом свободного абразива/ А.Л. Медведев // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. збірник наукових праць. — Краматорськ: ДДМА, 2010. — Вип. № 26. — С. 75–81.
4. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
5. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. — М.: Машиностроение, 1977. — 391 с.

*Поступила в редакцию 23.01.2014 г.*

**Гусев В.В., Медведев А.Л. Теоретичне дослідження механізму взаємодії вільного абразиву зі зв'язкою шліфувального круга й притиру при управлінні станом робочої поверхні алмазного круга**

Розроблено математичну модель процесу взаємодії вільного абразиву з поверхнями алмазного шліфувального круга та притира, що описує закономірності процесу зносу зв'язки круга як динамічного процесу змінення зазору між зв'язкою шліфувального круга й притиром в залежності від властивостей, розмірів вільного абразиву, швидкостей подачі абразивного матеріалу й притиру.

**Ключові слова:** вільний абразив, алмазний шліфувальний круг, притир, параметри управляючого впливу, знос робочої поверхні алмазного шліфувального круга.

**Gusev V.V., Medvedev A.L. The communication mechanism of free abrasive, post and micro-sizing tool in control action on working surface of diamond grinding wheel**

Mathematic model of communication mechanism of free abrasive, post and micro-sizing tool were made, which are list the post's rules as a dynamic process of change distance between post and micro-sizing tool in time and depends on characteristic and size of free abrasive, velocity of micro-sizing tool and free abrasive.

**Keywords:** free abrasive, diamond grinding wheel, micro-sizing tool, characteristic of control actions, wear of diamond grinding wheel.