РАСЧЕТ РАЗМЕРНОГО ИЗНОСА АБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН ПРИ НАРУЖНОМ КРУГЛОМ ШЛИФОВАНИИ

В. Б. Богуцкий, Ю. К. Новосёлов, С. М. Братан
Севастопольский национальный технический университет,
г.Севастополь, Украина

Для управления процессом шлифования в условиях автоматизированного производства необходимо располагать информацией о закономерностях размерного износа инструмента. В настоящее время в работах Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучавы, Н.И. Богомолова и ряда других исследователей [1,2,3] наиболее изучены механизмы износа единичных абразивных зерен и явления, возникающие при контакте зерна с материалом. В тоже время 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.

Целью работы является изучение закономерностей износа абразивных зерен и их связь с износом шлифовального круга для условий круглого шлифования.

Зона контакта при круглом шлифовании представляет собой, в геометрическом изображении, форму двух сегментов (рисунок 1, а), в тоже время, действительная форма зоны контакта отличается от её геометрического изображения. Это происходит из-за того, что в результате контакта абразивных зерен с материалом обрабатываемой детали её радиус изменяется на величину радиального съема , радиус шлифовального круга — на величину его радиального износа , а на поверхности остается слой шероховатости поверхности. Упругие и температурные деформации элементов технологической системы изменяют глубину микрорезания, под действием возникающих сил абразивные зерна утапливаются в связку инструмента и линия, ограничивающая зону контакта со стороны материала, будет смещаться к центру вращения круга.

Абразивные зерна на рабочей поверхности круга расположены на различной глубине от условной наружной поверхности инструмента, 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 микрорельеф, образовавшийся на предыдущей операции или при выполняемом 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 возрастает доля удаленной части материала, а если зерно попадает во впадину – материал не снимается. В каждой точке зоны контакта абразивного зерна с материалом детали условия контакта отличаются. Активная работа зерна проявляется после того, как оно начнет проходить через зону контакта. Глубина резания единичным абразивным зерном, которое расположено на расстоянии от условной наружной поверхности инструмента (рисунок 1, а), в основной плоскости, проходящей через центр детали и центр шлифовального круга, для любого - того контакта инструмента с заготовкой равна

$$t_{g_i} = t_{f_i} - u_{g_i} \qquad (1)$$

При движении в зоне контакта, глубина микрорезания определяется из соотношения [5]

$$t_{g_i}(z) = t_{g_i} - z^2 \big/ D_э \ . \qquad (2)$$

где $D_э$ – эквивалентный диаметр, $D_э = \dfrac{D_{кр} \cdot d_д}{D_{кр} + d_д}$

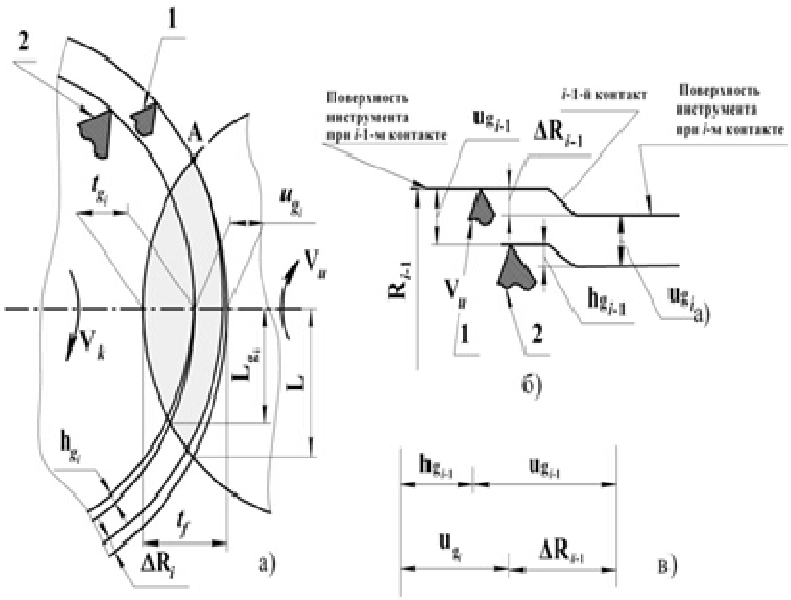

Рисунок 1 – Схема к расчету пути резания единичного абразивного зерна

Контактируя с деталью, зерно пересекает разные уровни её поверхности y_j и в зависимости от её состояния, соотношение удаленного и неудаленного материала различено. При движении в зоне контакта величина y_j может увеличиваться от 0 до t_{g_i} и затем снижаться до 0 соответственно различна и вероятность контакта P_k. Величина y_j для $j-i-1$ -го контакта определена как $y_{j-i-1} = y_j + \sum_{k=j-1}^{j} \Delta r_k$ [6].

Проанализируем работу двух абразивных зерен при $i-1$ -вом контакте круга с заготовкой, вершина первого из них находится на условной рабочей поверхности инструмента, а вершина второго расположена на расстоянии u_{gi} по глубине инструмента (рисунок 1, а). Вполне очевидно, что при одном контакте износ первого зерна h_{g1} будет больше износа второго h_{g2}, так как длина его траектории движения $2L_{g_1}$ и глубина микрорезания t_{g_i} в зоне контакта больше и, кроме того, вероятность контакта его вершины с материалом так же больше.

На рисунке 1, б показана развертка условной наружной поверхности инструмента. Условная наружная поверхность инструмента до $i-1$ -го контакта описывается радиусом R_{i-1} и, соответственно, расстояние между первым и вторым зернами равно $u_{g_{i-1}}$. После $i-1$ -го контакта, с учетом радиального износа инструмента ΔR_{i-1}, условная наружная поверхность описывается радиусом R_i. Расстояние между первым и вторым зернами уменьшилось на величину износа зерна $h_{g_{i-1}}$ и теперь равно u_{g_i}. Согласно рисунка 1, б можно построить размерную цепь, показанную на рисунке 1, в.

Для i-го контакта, как следует из размерной цепи (рисунок 1, в)

$$u_{g_i} = u_{g_{i-1}} + h_{g_{i-1}} - \Delta R_{i-1} \qquad (3)$$

где $u_{g_{i-1}}$ и u_{g_i} – координаты вершины зерна до $i-1$-го и i-го контактов; ΔR_{i-1} и $h_{g_{i-1}}$ – радиальный износ круга и износ вершины зерна при выполнении $i-1$-го (до начала i-го) контакта.

Подставив значение u_{g_i} из уравнения (3) в уравнение (1) и учитывая, что глубину микрорезания t_{f_i} при $i-м$ контакте можно определить как $t_{f_i} = t_{f_{i-1}} + \Delta t_{f_i}$ (Δt_{f_i} изменение глубины микрорезания при $i-м$ контакте)

получим разностное уравнение, устанавливающее связь износа абразивного инструмента ΔR_{i-1} с износом единичных абразивных зерен $h_{g_{i-1}}$ при различных режимах обработки (параметры $t_{g_{i-1}}$ и Δt_{f_i}).

$$t_{g_i} = t_{g_{i-1}} + \Delta t_{f_i} - h_{g_{i-1}} + \Delta R_{i-1} \quad (4)$$

В стадии установившегося износа обычно принимается, что размерный износ инструмента пропорционален величине относительного износа h_0 и пути резания $L_{рез}$. Величина относительного износа h_0 зависит от марок инструментального материала и обрабатываемой детали и по данным работы [4] пропорциональна глубине микрорезания $h_{g0} = K_h t_{g_i}$, где K_h – коэффициент пропорциональности. Соответственно, величину размерного износа единичного абразивного зерна можно записать как

$$h_{g_i} = K_h t_{g_i} L_{рез}. \quad (5)$$

Длина пути резания единичным абразивным зерном $L_{рез}$ не равна длине траектории его движения и может быть установлена только на основе анализа вероятности контакта вершин зерен с материалом. Вероятность контакта вершины абразивного зерна с материалом P_k в любой точке зоны контакта определяется вероятностью неудаления материала [4]

$$P_k = 1 - P(M) = P\left(\overline{M}\right),$$

Суммарная длина пути резания зависит от длины траектории движения абразивных зерен в зоне контакта и вероятности контакта и на $i-м$ обороте круга определяется по зависимости

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

а зависимость для расчета износа абразивного зерна будет иметь вид

$$h_{g_i} = \int_{-L_{g_i}}^{L_{g_i}} K_h t_{g_i} P\left(\overline{M}\right) dz, \quad (7)$$

где L_{g_i} – расстояние от основной плоскости до точек входа в зону и выхода из зоны абразивного зерна при i-ом контакта круга с деталью, определяется по ниже приведенной зависимости $L_{g_i} = \sqrt{t_{g_i} D_э}$.

Как показано в работе [4], вероятность неудаления материала на уровне y (рис.1,в) рассчитывается по зависимости

$$P(\overline{M}) = e^{-a_0 - a_1 - a_2 - \ldots - a_{j-1} - a_j(y)}, \quad (8)$$

где j – номер контакта материала детали с абразивным зерном, a_0 – показатель, определяющий исходное состояние поверхности, $a_1, a_2, \ldots a_{j-1}, a_j(y)$ – показатели, характеризующие изменение вероятности удаления материала с рассматриваемого участка поверхности после первого, второго и т.д. касаний детали с кругом.

Согласно [6] вероятность контакта абразивных зерен с обрабатываемым материалом определяется по зависимости

$$P_k = P(\overline{M}) = \exp\left\{ - \frac{\pi K_c \sqrt{2\rho_g}(V_k \pm V_u) n_g}{V_u H_u^{3/2}} \times \left[\frac{2}{5} \sqrt{D_э} \sum_{i=2}^{n} (t_f - y_j - i\Delta r)^{5/2} + \frac{3}{8}(t_f - y_j - \Delta r)^2 \times \right.\right.$$

$$\left.\left. \left(z - \frac{2z^3}{3L_{y_j}^2} + \frac{z^5}{5L_{y_j}^4} + \frac{8}{15} L_{y_j}\right) \right] \right\} \quad (9)$$

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; V_k – скорость круга; V_u – скорость детали; n_g – количество вершин зерен на единицу поверхности рабочего слоя круга; ρ_g – радиус округления при вершине зерна; H_u – величина слоя рабочей поверхности круга по глубине, в пределах которого подсчитывается число абразивных зерен n_g; L_{y_j} - расстояние от основной плоскости до пересечения уровня y_j с условной наружной поверхностью инструмента, $L_{y_j} = \sqrt{(t_f - y_j) D_э}$.

Обрабатываемый материал на уровне y_j будет удаляться только при выполнении

тех касаний, для которых глубина микрорезания больше расстояния до уровня y_{j-i-1}, т.е. соблюдается условие $t_{fj-i} \geq y_{j-i-1}$. Если $t_{fj-i} < y_{j-i-1}$, то материал на наблюдаемом уровне не удаляется и слагаемое $\sum_{i=2}^{n}(t_f - y_j - i\Delta r)^{5/2}$ при вычислениях уравнения (9) приравнивается к нулю.

На рисунке 2 приведены результаты расчетов вероятности контакта абразивных зерен с обрабатываемым материалом образцов из закаленной стали диаметром 50 мм кругами из электрокорунда белого зернистостью 25 при скорости круга $V_k = 35 м/с$, скорости детали $V_u = 0.2 м/с$.

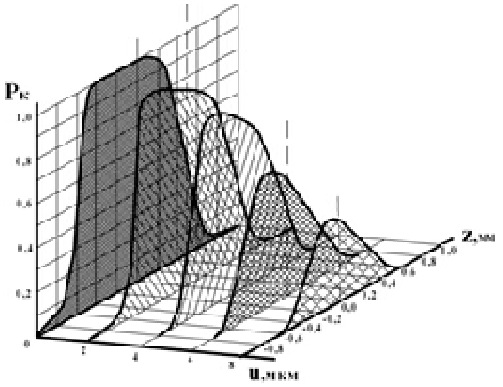

Рисунок 2 – Вероятность контакта вершины зерна с обрабатываемым материалом

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_g 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. Все кривые расположены внутри кривой $u_g = 0$ и имеют меньшую протяженность, максимум всех кривых смещен в сторону отрицательных значений z и уменьшается по величине с увеличением u_{g_i}.

Для численного решения интеграла (6) и разностного уравнения (4) по методу Симпсона на ПК разработана блок-схема алгоритма расчета (рисунок 3). Результаты расчетов по приве-денному алгоритму представлены на рисунках 4 и 5 для случая шлифования образцов из зака-ленной стали диаметром 50 мм кругами 1-300х20х127 24А 25-Н СМ2 Б.

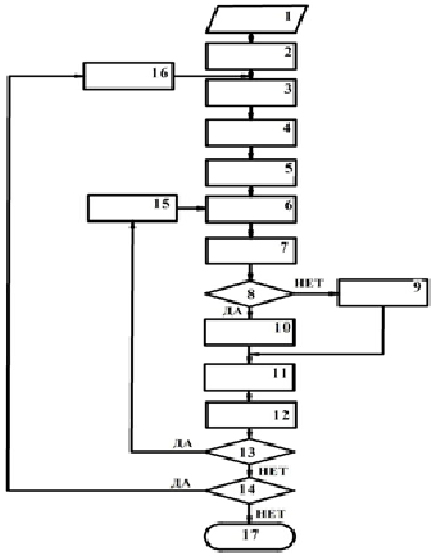

Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма расчета износа абразивных зерен: 1.Ввод исходных данных ($D_k, d_o, K_c, V_k, V_u, \rho, n_g, \Delta z, K_h, \Delta R$); 2.Расчет $D_э, \Delta r, H_u$ 3. Задание номера оборота детали j 4.Расчет значения t_{g_i}; 5.Расчет значений z и L_{g_i}; 6.Расчет величины $t_{g_i}(z)$ и текущего значения y_{j-i}; 7.Расчет количества съемов за один контакт $_n$; 8. Проверка условия удаления материала $t_f \geq y_{j-i}$; 9. Расчет показателя степени a_j при $t_f \geq y_{j-i}$; 10. Расчет показателя степени a_j при $t_f \leq y_{j-i}$; 11. Расчет вероятности контакта $_{P_k}$; 12. Расчет величины износа зерна $h_{g_{j-1}}$; 13.Проверка условия $-\sqrt{t_{g_i} D_э} \leq z$; 14.Проверка условия окончания цикла обработки $t_g \leq 0{,}99 t_f$;15.Изменение координаты z 16.Изменение номера контакта детали $(j = j+1)$.

Приведенные трехмерные графики позволяют получить основные параметры работы абразивных зерен в зоне контакта. 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. При первых 100…200 касаниях вероятность контакта абразивного верна с металлом и длина пути резания практически равны нулю, вершина зерна не изнашивается, глубина микрорезания увеличивается почти пропорционально $i = v_k \tau$. 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.

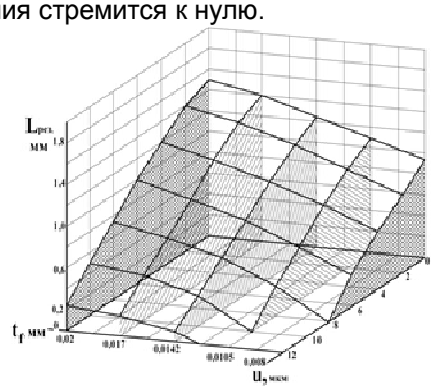

Рисунок 4 – Длина пути резания единичным абразивным зерном

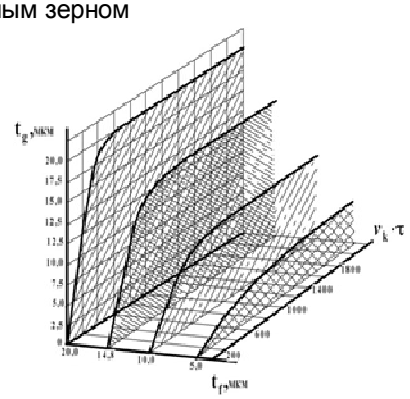

Рисунок 5 – Влияние числа контактов круга с деталью на глубину микрорезания абразивным зерном при шлифовании закаленной стали

Цикл активной работы зерна заканчивается при его разрушении под действием сил и температур, возникающих при микрорезании.

Выводы. Полученные зависимости описывают динамику износа единичных абразивных зерен в условиях работы инструмента в режиме затупления. Износ зерен непрерывно увеличивается, затупившиеся вершины перестают резать, что приводит к снижению производительности процесса. Для дальнейшего развития необходимо обеспечить самозатачиваемость шлифовального круга, что является задачей дальнейших исследований.

Список литературы:

1.Износ алмазов и алмазных кругов/Т.Н.Лоладзе, Г.В.Бокучава. − М.: Машиностроение, 1967. − 113 с.

2.Багдасарян К.А. О работоспособности шлифовальных кругов и работе шлифования. - В кн.: Основные вопросы высокопроизводительного шлифования. М., Машгиз,1960, С.161-170.

3.Богомолов Н.И. Роль прочности абразива и механизм саморегулирования в процессах абразив-ной обработки /Н.И. Богомолов// Физико-химические явления при шлифовании. Киев: АН УССР, 1976. С.32-40.

4.Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке /Ю.К.Новоселов. – Саратов : Изд-во Саратовского ун-та:, 1979. – 232с.

5.Братан С.М. Взаимосвязь перемещений в технологической системе при чистовом и тонком шли-фовании / С.М.Братан, Ю.К.Новоселов, Д.Е.Сидоров //Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. тр. - Вып.8 - Изд–во СевНТУ Севастополь, 2005 С.79-85.

6. Ю.К.Новоселов Износ абразивных зерен в круге при шлифовании заготовок/ Ю.К.Новоселов, В.Б.Богуцкий, // Резание и инструмент в технологических системах: Международн. науч.-техн. сб. – Харь-ков: НТУ «ХПИ», 2012. – Вып. 81. – С.228-237