

УДК 621.923

## МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АЛМАЗНЫХ ЗЕРЕН С ОРГАНИЧЕСКОЙ СВЯЗКОЙ КРУГА ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Новиков С.Г., канд. техн. наук, **Малыхин В.В.**, канд. техн. наук (г. Курск, Россия), **Новиков Ф.В.** докт. техн. наук (г. Харьков, Украина)

*Model of interaction of diamond grains with organic sheaf of a circle at grinding.*

Известны модели удержания алмазных зерен в связках шлифовального инструмента в виде куба, прямоугольного параллелепипеда или сферы с диаметром, равным наибольшему размеру зерна [1].

Недостатками предлагаемых моделей являются: зерна одинаково жестко заделаны как в металлическую, так и органическую связки шлифовального инструмента; не учитывается геометрия зерна; центр поворота алмазного зерна при потере устойчивости выбран на оси симметрии зерна; неверно объяснено образование на поверхности связки лунки удлиненной формы без остатков разрушившегося зерна.

Известна модель удержания алмазного зерна в связках шлифовального инструмента, включающая два обратных круговых конуса с общим основанием, при этом один из конусов обращен к обрабатываемому материалу, а второй расположен в связке [2].

Модель имеет следующие недостатки:

1. Зерна одинаково жестко заделаны в металлическую и органическую связки инструмента. Но зерна «утопают» в процессе шлифования в более мягкую органическую связку, то есть нельзя считать, что алмазное зерно жестко защемлено в органической связке инструмента.

2. Для раскрытия физической сущности шлифования алмазным кругом на металлической связке рассматривается схема, в которой режущее зерно находится под действием лишь радиальной составляющей силы резания. При шлифовании кругами на органических связках наряду с радиальной необходимо учитывать и тангенциальную составляющую силы резания, действующую на отдельное зерно круга.

3. Центр поворота алмазного зерна при потере устойчивости расположен на оси симметрии конусов, что не позволяет учитывать радиальную составляющую силы резания при вырывании (опрокидывании) зерна из связки.

4. Невозможность аналитического исследования поведения режущего зерна в органических связках и определения направлений повышения эффективности процесса шлифования.

Ранее [3, 4] нами предложена физическая модель шлифования алмазными кругами на органических связках. В настоящей работе предложена новая модель, технической задачей которой является исследование поведения и удержания алмазного зерна в органических связках шлифовального инструмента с учетом геометрии, износа зерна и действующих на него сил.

На рис. 1,а изображена модель алмазного зерна в статическом положении, когда не происходит процесс шлифования; на рис.1,б - алмазное зерно в органической связке в промежуточном положении; на рис.1,в - алмазное зерно в

момент его вырывания из органической связки шлифовального инструмента.

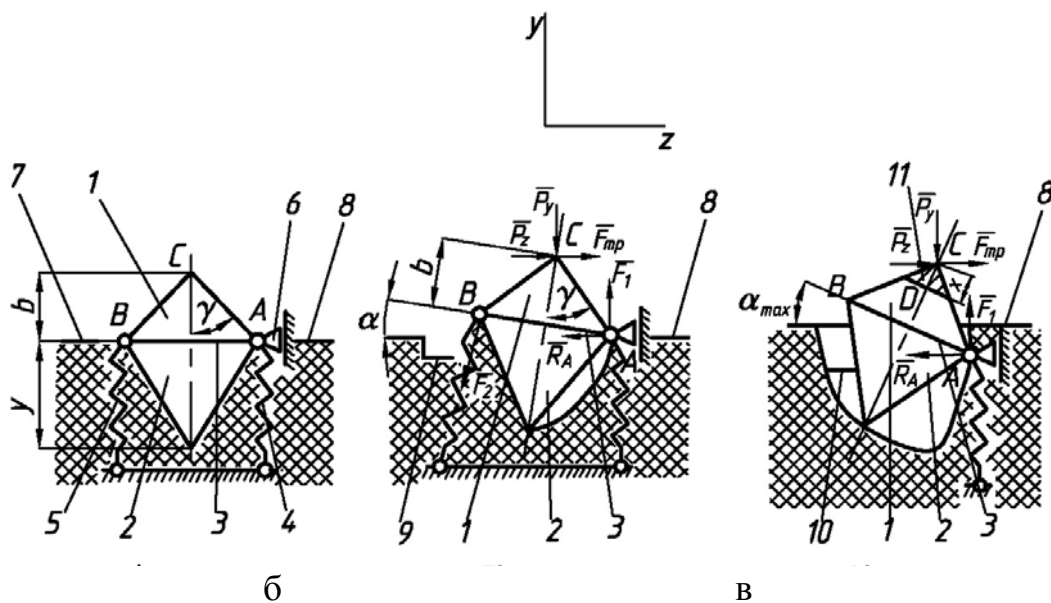


Рис.1. Расчетная схема процесса резания.

Модель удержания алмазного зерна в органических связках шлифовального инструмента включает два обратных конуса 1 и 2 с общим основанием 3, при этом конус 1 обращен к обрабатываемому материалу, а конус 2 расположен в связке, общее основание конусов 3 в диаметрально расположенных точках А и В в плоскости действия радиальной и тангенциальной составляющих силы резания размещено на двух параллельных пружинах 4 и 5, расположенных со стороны органической связки в направлении радиальной составляющей силы резания, точка А основания 3, удаленная от оси симметрии конусов 1 и 2 в направлении тангенциальной составляющей, выполнена в виде шарнирной подвижной опоры 6, с возможностью ее перемещения в направлении радиальной составляющей силы резания. В момент начала шлифования уровни органической связки 7 перед зерном и за зерном 8 одинаковы.

Для анализа поведения зерна при шлифовании введены обозначения:  $b$  - исходная максимальная высота выступания зерна над уровнем связки, м;  $\gamma$  - половина угла при вершине конуса 1 режущего зерна, град;  $y$  - высота конуса 2, расположенного в связке, равная наибольшему размеру зерна (критическая заделка зерна), м (рис. 1,а).

Модель функционирует следующим образом.

Выбираем систему координат  $YZ$ . При шлифовании острым зерном в вершине С конуса 1 приложены радиальная  $\bar{P}_y$  и тангенциальная  $\bar{P}_z$  составляющие силы резания. Кроме того, примем во внимание силу трения скольжения  $\bar{F}_{\delta}$  между алмазным зерном и обрабатываемым материалом, направленную в противоположную сторону от скорости круга  $\bar{V}_{кр}$ , то есть сила  $\bar{F}_{mp}$  совпадает по направлению с вектором  $\bar{P}_z$ . Модуль  $F_{mp} = f \cdot N = f \cdot P_y$ , где  $f$  - коэффициент трения скольжения зерна с обрабатываемой поверхностью;  $N = P_y$  - нор-

мальная реакция обрабатываемой детали. Весом зерна пренебрегаем ввиду его малости.

Мысленно отбросим связи, заменив их действия реакциями: массив упругой связки за зерном велик, поэтому при действии усилия  $\bar{P}_z$  перемещения зерна вдоль оси  $Z$  не будет, следовательно, реакция  $\bar{R}_A$  шарнирной подвижной опоры 6 направлена в противоположную сторону оси  $Z$ ; сила упругости  $\bar{F}_1$  пружины 4 имеет направление вдоль оси  $Y$ ; органическая связка действует на основание 3 конусов 1 и 2 с распределенной нагрузкой, равнодействующая которой перпендикулярна основанию, тогда сила упругости пружины 5  $\bar{F}_2 \perp AB$ , предполагаем что пружина растянута (рис. 1,б).

Так как все указанные действующие на зерно силы расположены в одной плоскости  $YZ$ , то точки зерна движутся параллельно этой неподвижной плоскости. Такое движение зерна является плоскопараллельным (плоским), то есть зерно совершает сложное движение - поворот с одновременным поступательным движением. Таким образом, «утопание» алмазного зерна в более мягкую органическую связку можно представить как поступательное движение полюса  $A$  вдоль оси  $Y$  и поворот на угол  $\alpha$  вокруг полюса.

Составив три уравнения равновесия зерна под действием произвольной плоской системы сил, можно аналитически определять усилия и деформации, возникающие в органических связках в зависимости от положения в них алмазного зерна при шлифовании острым зерном. Например, составим сумму моментов всех сил относительно точки  $A$  и найдем момент  $M$ , возникающий в связке от силы  $\bar{F}_2$  и удерживающий зерно:

$$\sum M_{Ak} = 0; M + P_y \frac{b}{\cos \gamma} \cdot \sin(\gamma - \alpha) - (P_z + F_{mp}) \cdot \frac{b}{\cos \gamma} \cos(\gamma - \alpha) = 0.$$

Тогда 
$$M = P_y \frac{b \cdot \cos(\gamma - \alpha)}{\cos \gamma} \cdot [(K_{ш} + f) - \operatorname{tg} \gamma], \quad (1)$$

где  $K_{ш} = \frac{P_z}{P_y}$  - коэффициент шлифования.

Видим, что регулирование удержания зерна можно достичь через  $P_y, (K_{ш} + f), b, \gamma$ .

В свою очередь  $M = a \cdot y$ , где  $a$  - экспериментальная характеристика, учитывающая прочность удержания зерна в органической связке.

При плоскопараллельном движении зерна  $y$  постоянно увеличивается. При этом деформация и истирание органической связки приводит к ослаблению её жесткости и увеличению межзеренного пространства, то есть уменьшается параметр  $a$  и увеличивается величина  $b$ . Это в свою очередь вызывает «оголение» зерна и значительное перемещение его в связке. Кроме того, плоское движение зерна ослабляет адгезионные свойства связок, приводит к образованию «пустот» в них (люфт зерна), что объясняет выпадение зерен при малых усилиях (самозатачивающиеся связки).

Деформации и износ органических связок, приводящие к увеличению межзеренного пространства, а также плоское движение зерен, устраняющее или уменьшающее вдавливание стружки в связку, приводит к тому, что связка как бы “дышит”. Это объясняет малое “засаливание” (то есть заполнение межзеренного пространства круга образующимися стружками) кругов на органических связках даже при шлифовании пластичных материалов.

Под воздействием стружки, сходящей по передней поверхности зерна, образуется стружечная канавка перед зерном. Канавки по бокам зерна появляются от воздействия стружки, которая выдавливается из стружечной канавки перед зерном. Алмазное зерно защищает связку инструмента за собой. Плоское движение зерна значительно увеличивает износ связки перед зерном и по его бокам и существенно увеличивает защиту связки за зерном. Поэтому уровень связки круга 9 перед зерном при шлифовании постоянно уменьшается по отношению к уровню изношенной по высоте связки 8 за зерном. Ослабление фиксации зерна в органической связке приводит к увеличению угла поворота зерна  $\alpha$  в процессе шлифования. При достижении значения  $\alpha_{max}$  зерно вырывается из связки (рис. 1в).

Для определения  $\alpha_{max}$  рассмотрим условие опрокидывания (вырывания) зерна. Очевидно, что силы  $\bar{P}_z$  и  $\bar{F}_{mp}$ , создавая опрокидывающий момент  $M_0$ , стремятся опрокинуть (вырвать) зерно относительно точки А основания 3, наиболее удаленной от оси симметрии конусов 1 и 2 в их статическом положении. Момент органической связки  $M$  и сила  $\bar{P}_y$  с удерживающим моментом  $M_y$  сохраняют алмазное зерно в органической связке. Условие удержания зерна в связке имеет вид:  $M + M_y - M_0 = 0$ .

В момент вырывания зерна  $M_0 = 0$  (сила  $F_2 = 0$ ) и  $M_y \leq M_0$ .

После преобразований из зависимости (1) получаем:

$$\alpha_{max} \geq \gamma - \arctg(K_{uu} + f).$$

Так как весом зерна пренебрегаем, то

$$\alpha_{max} > \gamma - \arctg(K_{uu} + f). \quad (2)$$

Из выражения (2) понятно, что наибольшего угла  $\alpha_{max}$  можно достичь за счет увеличения  $\gamma$ , уменьшения  $K_{uu}$  (шлифование острым зерном) и снижения  $f$  (импрогнация круга). Удерживающие свойства связки зависят также от ее материала, смачиваемости зерна, от состояния его поверхности и формы. Перечисленные факторы и создание искусственной шероховатости на поверхности алмазных зерен при их металлизации, использование зерен неправильной формы продлевают время пребывания зерна в связке.

При вырывании зерна уровень связки 10 перед зерном минимален и намного ниже уровня 8 изношенной связки за зерном. Поэтому зерно под действием сил  $\bar{P}_z$  и  $\bar{F}_{mp}$  не может вдавливаясь в связку за зерном. Во время эксплуатации шлифовального круга кроме напряжений сдвига постоянно присутствуют и изгибные напряжения. Из-за превышения напряжений сдвига и изгиба выше допускаемых происходит поворот зерна относительно центра А и разрыв изношенной связки перед зерном, что объясняет появление на рабочей поверхности инструмента удлиненной рваной лунки с утонченным концом с

одной стороны без остатков разрушившегося зерна.

При шлифовании кругами на органических связках на алмазных зернах образуются площадки износа малых размеров, кроме того по мере затупления параметр шероховатости  $R_a$  стабилизируется во времени.

Различают три вида износа алмазного круга: круг теряет свои режущие свойства в результате износа зерен; затупившиеся зерна вырываются из связки; имеет место скалывание части зерна и образование новых режущих кромок, то есть круг работает в режиме самозатачивания. Однако, характер самозатачивания кругов на органической связке можно представить иначе.

При шлифовании острым зерном силы  $\bar{P}_y$ ,  $\bar{P}_z$ ,  $\bar{F}_{mp}$  приложены к вершине конуса 1, который затупляется и появляется площадка износа 11 на расстоянии  $x$ , м от вершины  $C$ .

При повороте зерна на угол  $\alpha_1$  шлифование происходит одной из граней образовавшейся площадки с образованием новой площадки. При повороте на угол  $\alpha_2 > \alpha_1$  съём материала с детали происходит одной из граней новой площадки и т.д. до вырывания зерна из связки, то есть происходит “огранка” зерна с постоянным образованием острых режущих кромок. Следовательно, самозатачивание кругов на органических связках происходит не только за счет обновления рельефа при вырывании зерен из связки, но и постоянной “огранкой” зерен при их плоском движении без скалывания вершин. Поэтому действующие на зерно силы приложены не в вершине  $C$ , а в постоянно меняющей свое положение точке  $D$ , являющейся гранью площадки износа, соприкасающейся в данный момент времени с обрабатываемым материалом. Стабилизацию  $R_a$  также можно объяснить шлифованием зерном с постоянно обновляющимися острыми гранями, которые образуются в процессе “огранки” зерна.

Составив уравнения равновесия (силы  $\bar{P}_y$ ,  $\bar{P}_z$ ,  $\bar{F}_{mp}$ , приложенные в точке  $D$ , не показаны), можно получить аналитические зависимости, позволяющие исследовать поведение и условия удержания зерна с учетом его геометрии и износа в органических связках шлифовального инструмента. Например, составим еще раз уравнение равновесия зерна относительно точки опрокидывания  $A$ :

$$\sum M_{Ak} = 0; M + P_y \left[ \frac{b}{\cos \gamma} \cdot \cos(90 - \gamma + \alpha) + \frac{x}{\cos \gamma} \cdot \cos(90 - \gamma - \alpha) \right] - (P_z + f \cdot P_1) \cdot \left[ \frac{b}{\cos \gamma} \cdot \sin(90 - \gamma + \alpha) - \frac{x}{\cos \gamma} \cdot \sin(90 - \gamma - \alpha) \right] = 0.$$

Имеем:

$$M = \frac{P_y}{\cos \gamma} \{ b \cdot \cos(\gamma - \alpha) \cdot [(K_{uu} + f) - \operatorname{tg}(\gamma - \alpha)] - x \cdot \cos(\gamma + \alpha) \cdot [(K_{uu} + f) + \operatorname{tg}(\gamma + \alpha)] \}. \quad (3)$$

Формула (3) позволяет определять момент в органической связке, удерживающий алмазное зерно с износом.

При  $M = 0$  решим уравнение (3) относительно величины “ $x$ ”:

$$x = \frac{b \cdot \cos(\gamma - \alpha_{max}) \cdot [(K_{uu} + f) - \operatorname{tg}(\gamma - \alpha_{max})]}{\cos(\gamma + \alpha_{max}) \cdot [(K_{uu} + f) + \operatorname{tg}(\gamma + \alpha_{max})]} \quad (4)$$

При  $x = 0$  (шлифование острым зерном) зависимость (4) трансформируется в выражение (2), определяющее  $\alpha_{max}$ .

При  $x = b$  решим уравнение (4) относительно  $(K_{uu} + f)$ :

$$(K_{uu} + f) = \frac{\sin(\gamma + \alpha_{max}) + \sin(\gamma - \alpha_{max})}{\cos(\gamma - \alpha_{max}) - \cos(\gamma + \alpha_{max})}$$

Воспользовавшись формулами тригонометрических преобразований, находим:

$$(K_{uu} + f) = \operatorname{ctg} \alpha_{max} \quad (5)$$

Из выражения (5) получим зависимости:

$$\alpha_{max} = \operatorname{arcctg}(K_{uu} + f); \quad (6)$$

$$K_{uu} = \operatorname{ctg} \alpha_{max} - f; \quad (7)$$

$$f = \operatorname{ctg} \alpha_{max} - K_{uu} \quad (8)$$

В формулах (5) – (8) отсутствует угол  $\gamma$ . Это означает, что зерно полностью изношено. При  $x = b$  обрабатываемый материал начнет контактировать со связкой круга. Это приведет к интенсивному разрушению связки и обновлению рабочей поверхности круга за счет выпадения зерен из связки. Малопрочные органические связки, которые, как правило, работают в режиме самозатачивания, характеризуются равномерным во времени износом.

Важное значение в обеспечении устойчивости алмазных зерен в связках инструмента имеют силы сцепления зерна и связки, которые возникают в результате одновременного действия различных явлений: механического зацепления-заклинивания зерна в связке, сил адгезии, образования химического соединения между материалами связки и зерна.

Вывод: предложенная модель позволяет:

1. Представить зерна, размещенные в органических связках, совершающими плоскопараллельное движение, что объясняет возможность “утопания” зерен в процессе шлифования в более мягкую органическую связку.

2. Раскрыть физическую сущность шлифования алмазным инструментом на органических связках с учетом геометрии, износа зерна и действующих на него радиальной и тангенциальной составляющих сил резания, а также силы трения скольжения между алмазным зерном и обрабатываемым материалом.

3. Обосновать выбор центра поворота алмазного зерна при его опрокидывании (вырывание зерна из связки) относительно диаметральной точки общего основания обратных круговых конусов, расположенной в направлении тангенциальной составляющей силы резания и силы трения скольжения.

4. Предложить новую разновидность самозатачивания инструмента на органических связках постоянной “огранкой” зерен, происходящей при их плоском движении без скалывания вершин зерен.

5. Объяснить стабилизацию во времени параметра шероховатости  $R_a$  при обработке материала инструментом на органических связках тем, что шлифование происходит зерном с постоянно обновляющимися острыми гранями, ко-

торые образуются в процессе “огранки” зерна.

6. Показать, что малое “засаливание” кругов на органических связках происходит из-за плоского движения зерна во время шлифования.

7. Аналитически исследовать поведение режущего зерна в органических связках и определить направления повышения эффективности процесса шлифования.

**Список литературы:** 1. Попов А.В. Механико-прочностной анализ алмазного шлифовального инструмента.- Тула: Тул. гос. ун-т, 2003. – 227 с. 2. Новиков Ф.В., Кушниренко О.Т. К вопросу о физической сущности процессов комбинированного алмазного шлифования // Вісник інженерної академії України 2000: інформація по 2-ій міжнародній науково-технічній конференції «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве» (1 - 3 листопада 2000 г., м. Харків). - Київ, 2000. - С. 244-252. 3. Новиков С.Г., Малыхин В.В. К вопросу физического моделирования шлифования алмазными кругами на органических связках// Тр. 4-й международной научно-техн. конференции “Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве” (23 - 24 октября 2001 г.). - Харьков, 2001. - С.128-134. 4. Малыхин В.В., Новиков С.Г. Количественная оценка удержания алмазных зерен в кругах на органической связке // Матер. 1-й научн.-техн. конференции “Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации” (17 - 19 сентября 2003 г.) - Курск, 2003. - С. 107-109.