

УДК 621.923

**В.В. Малыхин, С.Г. Новиков, Ф.В. Новиков, С.А. Лисин**

*Курский государственный технический университет*

*ГОУ СПО Курский электромеханический техникум*

*Харьковский национальный экономический университет*

**Поведение алмазного зерна в органических связках шлифовального инструмента**

*Предложена физическая модель алмазного зерна, объясняющая возможность его «утопания» в процессе шлифования в более мягкую органическую связку. Выведены аналитические зависимости, определяющие положения в органических связках алмазного зерна с учетом его износа под действием радиальной и тангенциальной составляющих силы резания и силы трения между зерном и обрабатываемым материалом.*

Особенностью поведения алмазного зерна в органических связках шлифовального инструмента является то, что в процессе шлифования отдельные алмазные зерна под действием составляющих силы резания, расположенных в одной плоскости, могут изменять свое положение в связке от «утопания» в нее до разворота в ней на некоторый угол  $\alpha$ , при максимальном значении которого они вырываются из связки.

Ранее [1,2] нами была предложена физическая модель шлифования алмазными кругами на органических связках и аналитическое решение определения усилий и деформаций, возникающих в связках при шлифовании, рассмотрены количественная оценка и условия удержания зерен в связках и вырывания из них, показан новый вид самозатачивания кругов, объяснены малое «засаливания» их и стабилизация параметра шероховатости  $R_a$ .

Алмазное зерно в органических связках совершает сложное плоско-параллельное движение, одновременно утопая в связку и разворачиваясь относительно одной из опорных точек в ней. Поэтому физическая модель алмазного зерна в упругой связке круга представлена в виде двух обратных конусов, имеющих общее основание, подпружиненных двумя параллельными пружинами, расположенными в диаметрально противоположных точках основания, причем одна из этих точек выполнена в виде подвижной шарнирной опоры, перемещающейся по вертикали (рис. а).

В предложенной модели высота конуса, расположенного в связке, принимается равной наибольшему размеру зерна  $y_1$  – критической глубине заделки зерна в связке, м.

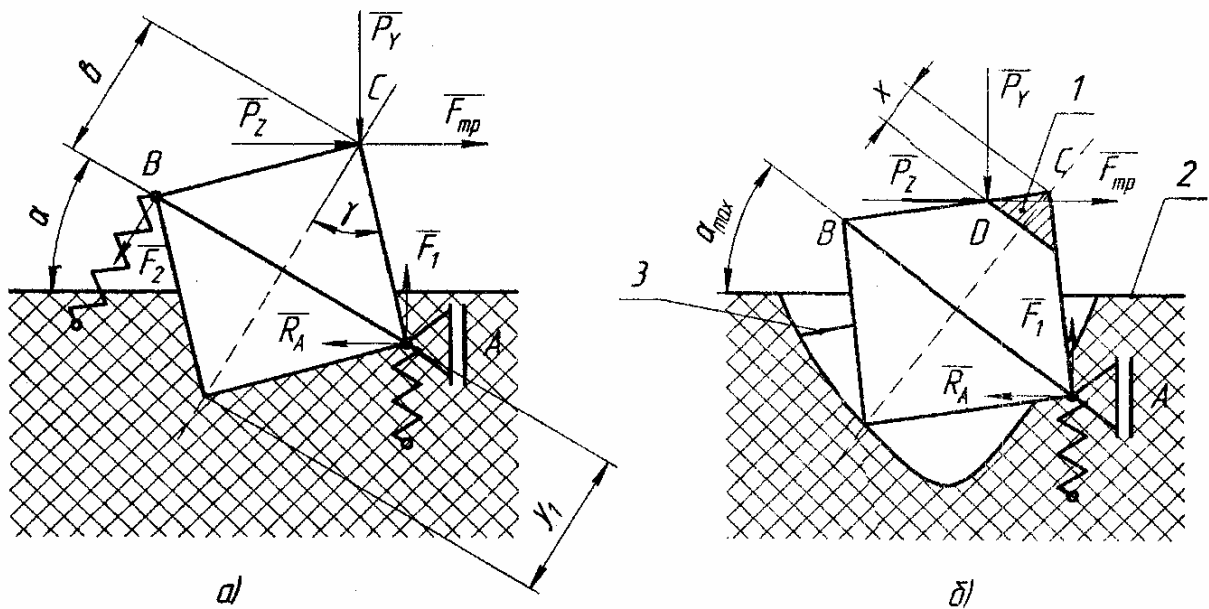


Рис. Расчетная схема процесса шлифования: 1 – изношенная часть режущего зерна; 2 – неизношенная по высоте связка за зерном; 3 – уровень связки перед зерном в момент его вырывания

Введем обозначения:  $b$  – исходная максимальная высота выступающего зерна над уровнем связки, м;  $x$  – величина линейного износа выступающего над связкой зерна, м;  $\gamma$  – половина угла при вершине режущего зерна, град.

Кроме действующих на зерно радиальной  $\overline{P}_y$  и тангенциальной  $\overline{P}_z$  составляющих силы резания рассмотрим силу трения скольжения  $\overline{F}_{тр}$  между алмазным зерном и обрабатываемым материалом, на-

правленную в противоположную сторону от скорости круга  $\bar{V}_{кр}$ , т. е. в выбранной схеме шлифования сила  $\bar{F}_{тр}$  совпадает по направлению с вектором  $\bar{P}_z$ . Модуль  $F_{мп} = f \cdot N = f \cdot P_y$ , где  $f$  – коэффициент трения круга с обрабатываемым материалом;  $N = P_y$  – нормальная реакция обрабатываемой поверхности. Весом зерна пренебрегаем ввиду его малости.

Очевидно, что ось поворота алмазного зерна при потере устойчивости пройдет через самую удаленную точку от его вертикальной симметричной оси в направлении сил  $\bar{P}_z$  и  $\bar{F}_{тр}$ , т. е. через точку А.

При добавлении силы трения все зависимости [1] претерпят изменения, и в них вместо коэффициента шлифования  $K_{ш} = \frac{P_z}{P_y}$  появится выражение  $(K_{ш} + f)$ .

Например, составим сумму моментов всех сил относительно точки А (рис. а) и определим момент, возникающий в связке и удерживающий зерно:

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

Тогда

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

Видим, что регулирования удерживающего момента можно достичь через  $P_y$ ,  $(K_{ш} + f)$ ,  $b$ ,  $\gamma$ .

В свою очередь  $M = a_1 \cdot y_1$ , где  $a_1$  – экспериментальная характеристика, учитывающая прочность удержания зерна в органической связке.

Первоначально можно считать для металлической и органической связок критические глубины заделки зерен одинаковыми. Однако при плоскопараллельном движении зерна  $y_1$  постоянно увеличивается и лунка углубляется. При этом деформация и истирание органической связки приводит к ослаблению её жесткости и увеличению межзеренного пространства, то есть уменьшается параметр  $a_1$  и увеличивается величина  $b$  (в кругах с металлической

связкой величина  $b$  уменьшается, величина  $a_1 \approx \text{const}$ ). Это в свою очередь вызывает «оголение» алмазного 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.

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» кругов на органических связках даже при шлифовании пластичных материалов.

Ослабление фиксации зерна в органической связке приводит к увеличению угла поворота зерна  $\alpha$  в процессе шлифования. При достижении значения  $\alpha_{\text{max}}$  зерно вырывается из связки.

Для определения  $\alpha_{\text{max}}$  рассмотрим условие опрокидывания (вырывания) зерна. При этом момент связки  $M = 0$  и из зависимости (1) имеем:

$$K_{\text{ш}} + f - \text{tg}(\gamma - \alpha_{\text{max}}) \leq 0,$$

или

$$\alpha_{\text{max}} \geq \gamma - \text{arctg}(K_{\text{ш}} + f). \quad (2)$$

Так как весом зерна пренебрегаем, то  $\alpha_{\text{max}} > \gamma - \text{arctg}(K_{\text{ш}} + f)$ .

Из (2) понятно, что наибольшего угла  $\alpha_{\text{max}}$  можно достичь за счет увеличения  $\gamma$ , уменьшения  $K_{\text{ш}}$  (шлифование острым зерном) и снижения  $f$ , тем самым продлевается время пребывания зерна в органической связке.

Плоское движение зерна значительно увеличивает износ связки перед зерном и по его бокам и защищает связку за зерном. Поэтому уровень связки круга 3 перед зерном в момент его вырывания значительно ниже неизношенной по высоте связки 2 за зерном (рис. 16). Во время эксплуатации шлифовального круга кроме напряжений сдвига постоянно присутствуют и изгибные напряжения. Сказанное объясняет появление на рабочей поверхности инструмента удлиненной рваной лунки с утонченным концом с одной стороны и с параметрами, меньшими размеров алмазного зерна, [3] из-за превышения на-

пряжений сдвига и изгиба – разрыв изношенной связки. Удерживающие свойства связки зависят от её материала, смачиваемости зерна, от состояния его поверхностей и формы. Создание искусственной шероховатости на поверхности алмазных зерен при их металлизации, использование зерен неправильной формы продлевают время пребывания зерна в связке.

Ранее нами была предложена разновидность износа алмазного зерна в органической связке – «огранкой» [1]. При шлифовании острым зерном все силы приложены в вершине конуса  $C$ , который затупляется и появляется площадка износа на расстоянии « $x$ ».

При повороте зерна на какой-то угол  $\alpha_1$  шлифование происходит одной из граней образовавшейся площадки с образованием новой площадки. При повороте на угол  $\alpha_2 > \alpha_1$  съём металла с детали происходит одной из граней новой площадки и т.д. до вырывания зерна из связки, т.е. 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, происходящей при их плоском движении без скалывания вершин зерна [1]. Поэтому действующие на зерно силы приложены не в вершине  $C$ , а в постоянно меняющейся своё положение точке  $D$ , являющейся гранью площадки износа, соприкасающейся в данный момент времени с обрабатываемым материалом (рис. б).

С учетом геометрии зерна и его износа составим уравнение равновесия относительно точки опрокидывания  $A$ :

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

Имеем:

$$M = \frac{P_y}{\cos \gamma} \left\{ \begin{array}{l} b \cdot \cos(\gamma - \alpha) [(K_{ш} + f) - \operatorname{tg}(\gamma - \alpha)] - \\ -x \cdot \cos(\gamma + \alpha) [(K_{ш} + f) + \operatorname{tg}(\gamma + \alpha)] \end{array} \right\}. \quad (3)$$

Формула (3) позволяет определять момент связки, удерживающей алмазное зерно с износом.

При  $M = 0$  решим уравнение (3) относительно величины износа связки:

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

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

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

$$\begin{aligned} \cos(\gamma - \alpha_{\max}) [(K_{ш} + f) - \operatorname{tg}(\gamma - \alpha_{\max})] &= \\ &= \cos(\gamma + \alpha_{\max}) [(K_{ш} + f) + \operatorname{tg}(\gamma + \alpha_{\max})]; \\ (K_{ш} + f) &= \frac{\sin(\gamma + \alpha_{\max}) + \sin(\gamma - \alpha_{\max})}{\cos(\gamma - \alpha_{\max}) - \cos(\gamma + \alpha_{\max})}. \end{aligned}$$

Воспользуемся формулами тригонометрических преобразований:

$$\begin{aligned} \sin(\gamma + \alpha_{\max}) + \sin(\gamma - \alpha_{\max}) &= 2 \sin \frac{(\gamma + \alpha_{\max}) + (\gamma - \alpha_{\max})}{2} \times \\ &\times \cos \frac{(\gamma + \alpha_{\max}) - (\gamma - \alpha_{\max})}{2} = 2 \sin \gamma \cdot \cos \alpha_{\max}; \\ \cos(\gamma - \alpha_{\max}) - \cos(\gamma + \alpha_{\max}) &= 2 \sin \frac{(\gamma - \alpha_{\max}) - (\gamma + \alpha_{\max})}{2} \times \\ &\times \sin \frac{(\gamma + \alpha_{\max}) - (\gamma - \alpha_{\max})}{2} = 2 \sin \gamma \cdot \sin \alpha_{\max}. \end{aligned}$$

Тогда

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

Из выражения (5) можно получить следующие зависимости:

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

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

$$f = \text{ctg} \alpha_{\max} - K_{\text{ш}}. \quad (8)$$

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

При других схемах шлифования сила  $\overline{F}_{\text{тр}}$  может быть направлена в противоположную сторону от направления вектора  $\overline{P}_z$ , тогда в полученные формулы войдет зависимость  $(K_{\text{ш}} - f)$ . Например, выражения (2), (5)–(8) примут вид:

$$\alpha_{\max} \geq \gamma - \text{arctg}(K_{\text{ш}} - f); \quad (9)$$

$$(K_{\text{ш}} - f) = \text{ctg} \alpha_{\max}; \quad (10)$$

$$\alpha_{\max} = \text{arcctg}(K_{\text{ш}} - f); \quad (11)$$

$$K_{\text{ш}} = \text{ctg} \alpha_{\max} + f; \quad (12)$$

$$f = K_{\text{ш}} - \text{ctg} \alpha_{\max}. \quad (13)$$

Зависимости (9)–(11) по новому раскрывают физическую сущность шлифования, состоящую в том, что все основные параметры определяются не просто коэффициентом резания при шлифовании или коэффициентом трения режущих зерен с обрабатываемым материалом, как это принято считать в теории шлифования, а их разностью  $(K_{\text{ш}} - f)$ , которая по мере затупления зерна  $K_{\text{ш}} \rightarrow f$  стремится принять нулевое значение и приводит к прекращению съема материала. Данная закономерность хорошо согласуется с экспериментальными данными М.Д. Узуняна, согласно которым

коэффициент  $K_{ш}$  при алмазно-искровом шлифовании твердых сплавов меньше, чем  $K_{ш}$  при обычном алмазном шлифовании на величину коэффициента трения обрабатываемого материала со связкой круга, т.е. введение электрической энергии в зону резания позволяет практически исключить трение обрабатываемого материала со связкой круга, а следовательно, разность  $(K_{ш} - f)$  определяет коэффициент «чистого» резания без учета трения обрабатываемого материала со связкой круга [4].

Вывод: предложенная физическая модель поведения алмазного зерна объясняет его текущее положение в органических связках шлифовального инструмента и образование на рабочей поверхности шлифовального круга лунки удлиненной формы без остатков алмазного зерна внутри нее. Полученные аналитические зависимости удержания в органических связках алмазных зерен с учетом их геометрии, износа, составляющих силы резания и силы трения позволяют объяснить механику шлифования и определить направления повышения его эффективности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков, С.Г. К вопросу физического шлифования алмазными кругами на органических связках [Текст] / С.Г. Новиков, В.В. Малыхин // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: тр. 4-й междунар. научн.-техн. конф. Харьков, 2001. С. 128–134.
2. Малыхин, В.В. Количественная оценка удержания алмазных зерен в кругах на органической связке [Текст] / В.В. Малыхин, С.Г. Новиков // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: матер. 1-й научн.-техн. конф. Курск, 2003. С. 107–109.
3. Попов, А.В. Механико-прочностной анализ алмазного шлифовального инструмента [Текст] / А.В. Попов. Тул. гос. ун-т. Тула, 2003. 227 с.
4. Новиков, Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования [Текст]: автореф. дис... докт. техн. наук: 05.02.08; 05.03.01 / Ф.В. Новиков. Одесса, 1995. 36 с.