

УДК 621.923

**С.Г. Новиков, В.В. Малыхин, Ф.В. Новиков, А.Н. Быков**

*ГОУ СПО Курский электромеханический техникум  
Курский государственный технический университет  
Харьковский национальный экономический университет*

## **ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН В СВЯЗКАХ ШЛИФОВАЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА**

Предложены физические модели поведения алмазно-абразивных зерен с учетом их износа как для металлических, так и органических связок шлифовального инструмента. Выведены аналитические зависимости для определения усилий, возникающих в связках под действием радиальной и тангенциальной составляющих силы резания, а также силы трения между зерном и обрабатываемой поверхностью.

Существующие предлагаемые модели удержания алмазно-абразивных зерен в связках шлифовального инструмента в виде куба, прямоугольного параллелепипеда или сферы с диаметром, равным наибольшему размеру зерна [1], имеют следующие недостатки:

1) неверно считается, что зерна одинаково жестко заделаны как в металлическую, так и в органическую связки;

2) не рассматривается геометрия зерна, например угол профиля при его вершине, который существенно влияет на процесс шлифования;

3) необоснованно выбран центр поворота алмазного зерна при потере устойчивости, расположенный на вертикальной оси симметрии, что не позволяет учитывать радиальную составляющую силы шлифования  $\bar{P}_y$ ;

4) не учтено наличие опоры за зерном, образовавшейся из-за того, что в процессе работы зерно защищает связку от износа позади себя, это существенно увеличивает опору зерна.

Мы полагаем, что необходимо дифференцировать физические модели удержания алмазно-абразивных зерен, расположенных в металлических и органических связках шлифовального инструмента.

Для металлических связок считаем адекватными жестко заделанными в них две модели алмазных зерен в виде полусферы и рас-

положенного на её экваториальной плоскости конуса (рис. а) или двух обратных конусов, имеющих общее основание (рис. б).

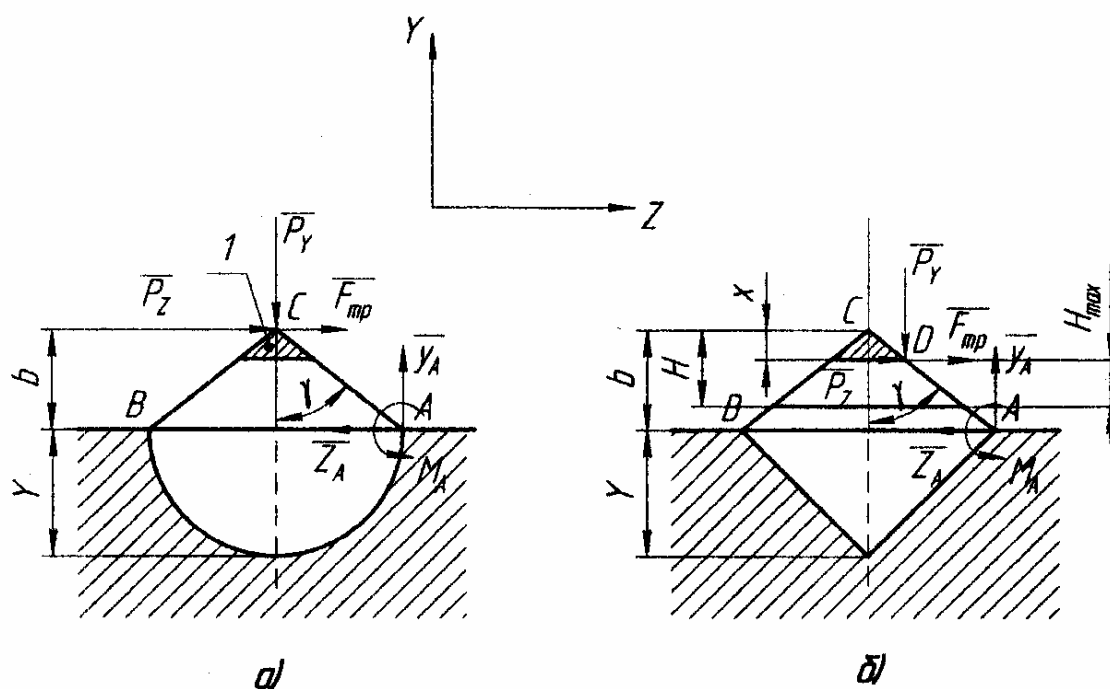


Рис. Расчетная схема процесса шлифования: 1 – изношенная часть режущего зерна; 2 – не изношенная по высоте связка за зерном; 3 – уровень связки перед зерном в момент его вырывания

Ранее [2,3] нами была предложена физическая модель шлифования алмазно-абразивными кругами на органических связках и аналитическое решение определения усилий и деформаций, возникающих в связках при шлифовании, рассмотрена количественная оценка и условия удержания зерен в связках и вырывания из них, показан новый вид самозатачивания кругов, объяснено их малое «засаливание» и стабилизация параметра шероховатости  $R_a$ .

Зерно в органических связках совершает сложное плоско-параллельное движение, одновременно утопая в связку и разворачиваясь относительно одной из опорных точек в ней. Поэтому модель 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.

Во всех моделях радиус полусферы и высоты конусов, расположенных в связках, принимаются равными наибольшему размеру зе-

рен  $y$  и  $y_1$  соответственно для металлической и органической связок, где  $y, y_1$  – критические глубины заделки зерен в связках, м.

Для анализа поведения зерна при шлифовании введены обозначения:  $b$  – исходная максимальная высота выступания зерна над уровнем связки, м;  $H_{\max}$  – максимальная вероятностная (приведенная) толщина среза, м;  $H$  – максимальная (условная) глубина внедрения зерна в обрабатываемый материал, м;  $x$  – величина линейного износа выступающего над связкой зерна, м;  $\gamma$  – половина угла при вершине режущего зерна, град.

На зерно действуют радиальная  $\bar{P}_y$  и тангенциальная  $\bar{P}_z$  составляющие силы резания. Кроме того, примем во внимание силу трения скольжения  $\bar{F}_{\text{тр}}$  между алмазным зерном и обрабатываемым материалом, направленную в противоположную сторону от скорости круга  $\bar{V}_{\text{кр}}$ , т. е. сила  $\bar{F}_{\text{тр}}$  совпадает по направлению с вектором  $\bar{P}_z$ . Модуль  $F_{\text{тр}} = f \cdot N = f \cdot P_y$ , 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 зерна при потере устойчивости пройдет через самую удаленную точку от его вертикальной оси симметрии в направлении сил  $\bar{P}_z$  и  $\bar{F}_{\text{тр}}$ , т. е. через точку А.

Для зерна в металлической связке мысленно отбросим жесткую заделку, заменив ее реактивным моментом  $M_A$  и реакцией  $\bar{R}_A$ , которую разложим по двум взаимно перпендикулярным направлениям:  $\bar{R}_A = \bar{Y}_A + \bar{Z}_A$ . Момент  $M_A = a \cdot y$ , где  $a$  – экспериментальная характеристика, учитывающая прочность удержания зерна в металлической связке, Н.

Из рисунка видим, что силы  $\bar{P}_z$  и  $\bar{F}_{\text{тр}}$  стремятся опрокинуть (вырвать) зерно относительно точки А, создавая опрокидывающий момент  $M_0$ , а сила  $\bar{P}_y$  сохраняет зерно в связке удерживающим моментом  $M_y$ . С учетом «х» минимальный удерживающий момент будет при прохождении обрабатываемой детали через точку D площадки износа, т.к. при этом плечо силы  $\bar{P}_y$  относительно точки А также минимально.

С учетом сказанного, составив уравнения равновесия зерна в металлической связке под действием произвольной плоской системы сил, можно определить реакции жесткой заделки зерна (усилия в металлической связке). Найдем, например,  $M_A$ :

$$\sum M_{Ak} = 0; M_A + P_y (b - x) \operatorname{tg} \gamma - (P_z + F_{\text{тр}})(b - x) = 0;$$

$$M_A = P_y (b - x)(K_{\text{ш}} + f - \operatorname{tg} \gamma), \quad (1)$$

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

Введем безразмерный параметр, определяющий степень затупления зерен  $\mu = \frac{x}{H} = 0 \dots 1$  (для острого зерна  $\mu \rightarrow 0$ , для затупленного  $\mu \rightarrow 1$ ).

Тогда  $x = \mu H$  и выражение (1) примет следующий вид:

$$M_A = P_y (b - \mu H)(K_{\text{ш}} + f - \operatorname{tg} \gamma). \quad (2)$$

Очевидно,  $H = H_{\text{max}} + x$ ,  $\mu = \frac{x}{H_{\text{max}} + x}$ .

Отсюда  $x = \frac{\mu H_{\text{max}}}{1 - \mu}$ . Из зависимости (1) получаем:

$$M_A = P_y \left( b - \frac{\mu H_{\text{max}}}{1 - \mu} \right) (K_{\text{ш}} + f - \operatorname{tg} \gamma). \quad (3)$$

Таким образом добиться увеличения  $M_y$  и уменьшения  $M_o$  можно применением силового шлифования ( $\bar{P}_y$ ), поддержанием постоянной относительной скорости износа зерна и связки ( $b - x = \text{const}$ ), увеличением угла при вершине конусного зерна ( $2\gamma$ ), повышением режущей способности круга за счет поддержания в нем «острого» режущего рельефа (уменьшение  $K_{\text{ш}}$ ) путем применения самозатачивающихся связок, комбинированных методов шлифования, за счет использования эффективных технологических сред, импрогнации круга (уменьшение  $f$ ) и т.д.

Рассмотрим случай, когда  $M_A = 0$  – момент вырывания зерна из связки, при этом  $M_y \leq M_o$ . Тогда из (1) видим, что

$$b - x = 0 \quad (4)$$

$$\text{или } K_{\text{ш}} + f - \text{tg}\gamma = 0. \quad (5)$$

Из выражения (4) следует, что по мере затупления зерен увеличивается условная глубина внедрения зерна в обрабатываемый материал  $H$ , и при значении  $b = x$  обрабатываемый материал начнет контактировать со связкой круга. Поэтому при шлифовании инструментом на прочных металлических связках, которые не склонны к самозатачиванию, круги быстро затупляются, теряют режущую способность и засаливаются из-за вдавливания образующихся стружек в связку.

Таким образом, для нормальной работы круга необходимо в процессе шлифования управлять параметром  $H$ , обеспечивая полный сьем подводимого в зону резания материала на уровне  $H \leq b$ .

Из выражений (2, 3) можно определять  $\mu$ ,  $H_{\text{max}}$ ,  $H$  в зависимости от условий задачи.

$$\text{Из (5) имеем } \text{tg}\gamma = K_{\text{ш}} + f. \quad (6)$$

Из зависимости (6) определяются  $K_{\text{ш}}$  или  $f$ .

Под действием системы внешних сил  $\overline{P}_y$ ,  $\overline{P}_z$ ,  $\overline{F}_{\text{тр}}$  зерно в органической связке переместится поступательно вместе с полюсом  $A$  и одновременно повернется вокруг него на угол  $\alpha$ . Отбросим связи, заменив их действие реакциями: реакция  $\overline{R}_A$  подвижной опоры направлена горизонтально; сила упругости пружины  $\overline{F}_1$  имеет вертикальное направление; сила упругости  $\overline{F}_2 \perp AB$ .

Составив уравнения равновесия зерна, можно определять усилия, возникающие в органических связках.

При добавлении силы трения все зависимости [2] претерпят изменения, и в них вместо коэффициента шлифования  $K_{\text{ш}}$  появится выражение  $(K_{\text{ш}} + f)$ .

Например, составим сумму моментов всех сил относительно точки  $A$  и определим момент, возникающий в связке и удерживающий зерно:

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

$$\text{Тогда } M = P_y \frac{b \cdot \cos(\gamma - \alpha)}{\cos \gamma} \cdot [(K_{\text{ш}} + f) - \text{tg} \gamma]. \quad (7)$$

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

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  $y \approx y_1$ . Однако при плоскопараллельном движении зерна  $y_1$  постоянно увеличивается. 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  $a \approx \text{const}$ ). 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.

Деформации и износ органических связок, приводящие к увеличению межзеренного пространства, а также плоское движение зерен, устраняющее или уменьшающее вдавливание стружки в связку, приводят 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  $M = 0$ , а из зависимости (7) имеем:

$$\alpha_{\text{max}} \geq \gamma - \text{arctg}(K_{\text{ш}} + f). \quad (8)$$

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

Из (8) 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 перед зерном в момент его вырывания значительно ниже неизношенной по высоте связки за зерном. Во время эксплуатации шлифовального круга кроме напряжений сдвига постоянно присутствуют и изгибные напряжения. Удерживающие свойства связки зависят от её материала, смачиваемости зерна, от состояния его поверхности 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» [2]. При шлифовании острым зерном все силы приложены в вершине конуса  $S$ , 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 «огранки» зерен, происходящей при их плоском движении без скалывания вершин. Поэтому действующие на зерно силы приложены не в вершине  $S$ , а в постоянно меняющей своё положение точке, являющейся гранью площадки износа, соприкасающейся в данный момент времени с обрабатываемым материалом.

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

$$M = \frac{P_y}{\cos \gamma} \left\{ b \cdot \cos(\gamma - \alpha) \cdot [(K_m + f) - \operatorname{tg}(\gamma - \alpha)] - \right. \\ \left. - x \cdot \cos(\gamma + \alpha) \cdot [(K_m + f) + \operatorname{tg}(\gamma + \alpha)] \right\}. \quad (9)$$

Формула (9) позволяет определять момент органической связки, удерживающий зерно с учетом « $\alpha$ ».

При  $M = 0$  решим уравнение (9) относительно величины  $x$ :

$$x = \frac{b \cdot \cos(\gamma - \alpha_{\max}) \cdot [(K_{\text{ш}} + f) - \text{tg}(\gamma - \alpha_{\max})]}{\cos(\gamma + \alpha_{\max}) \cdot [(K_{\text{ш}} + f) + \text{tg}(\gamma + \alpha_{\max})]} \quad (10)$$

При  $x = 0$  (шлифование острым зерном) зависимость (10) трансформируется в выражение (8), определяющее  $\alpha_{\max}$ .

При  $x = b$  решим уравнение (10) относительно  $(K_{\text{ш}} + f)$ :

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

Воспользовавшись формулами тригонометрических преобразований, имеем:

$$(K_{\text{ш}} + f) = \text{ctg}\alpha_{\max} \quad (11)$$

Из выражения (11) можно получить зависимости:

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

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

$$f = \text{ctg}\alpha_{\max} - K_{\text{ш}}. \quad (14)$$

В зависимостях (11) – (14) 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 связки, которые, как правило, работают в режиме самозатачивания, характеризуются равномерным во времени износом.

Важное значение в обеспечении устойчивости алмазно-абразивных 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 зернами.

### Выводы

Предложенные физические модели позволяют представить дифференцированные расположения алмазно-абразивных зерен как



в металлических, так и в органических связках шлифовального инструмента с учетом геометрии зерен и действующих на них сил, а также дают возможность аналитически исследовать процесс шлифования и определить направления повышения его эффективности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов, А.В. Механико-прочностной анализ алмазного шлифовального инструмента [Текст] / А.В. Попов; Тул. гос. ун-т. Тула, 2003. 227 с.
2. 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. науч.-техн. конф. Харьков, 2001. С. 128-134.
3. 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 науч.-техн. конфер. Курск, 2003. С. 107-109.