

Ф. В. НОВИКОВ, докт. техн. наук, **А. Н. КОВАЛЬЧУК**, ХНЭУ, г. Харьков

УСЛОВИЯ РАЗРУШЕНИЯ РЕЖУЩИХ ЗЕРЕН АЛМАЗНОГО КРУГА ПРИ ШЛИФОВАНИИ

В роботі наведено теоретичний аналіз умов руйнування ріжучих зерен при шліфуванні з точки зору забезпечення стійкої в часі роботи алмазного круга.

В работе приведен теоретический анализ условий разрушения режущих зерен при шлифовании с точки зрения обеспечения устойчивой во времени работы алмазного круга

В процессе шлифования под действием механических нагрузок происходит поверхностное и объемное разрушение режущих зерен алмазного круга. Это приводит к изменению геометрических параметров режущей части зерен, параметров режущего рельефа алмазного круга и технико-экономических показателей шлифования: производительности, себестоимости и качества обработки.

В научно-технической литературе имеется ряд публикаций, посвященных механике разрушения режущих зерен алмазного круга в процессе шлифования [1-4]. Однако, данный вопрос изучен не достаточно полно и требует дальнейших аналитических исследований.

Цель работы – теоретический анализ условий разрушения режущих зерен при шлифовании с точки зрения обеспечения устойчивой во времени работы алмазного круга.

В наших работах [1, 6] предложен подход к расчету напряжений в режущем клине инструмента на основе так называемых “окружностей одинаковых напряжений”.

Рассмотрим сущность данного подхода. Согласно теории упругости [5], плоское напряженное состояние описывается следующими уравнениями в полярных координатах:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2 \cdot \tau_{r\theta}}{r} = 0, \quad (2)$$

где σ_r и σ_θ - соответственно нормальные компоненты напряжений в радиальном и окружном направлениях; $\tau_{r\theta}$ - касательная компонента напряжений; r - радиус; θ - угол.

Для определения компонент напряжений вводится функция напряжения φ , удовлетворяющая уравнениям (1) и (2):

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2}; \quad (3)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2}; \quad (4)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right). \quad (5)$$

Функция напряжения φ определяется из уравнения совместности:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} \right) = 0. \quad (6)$$

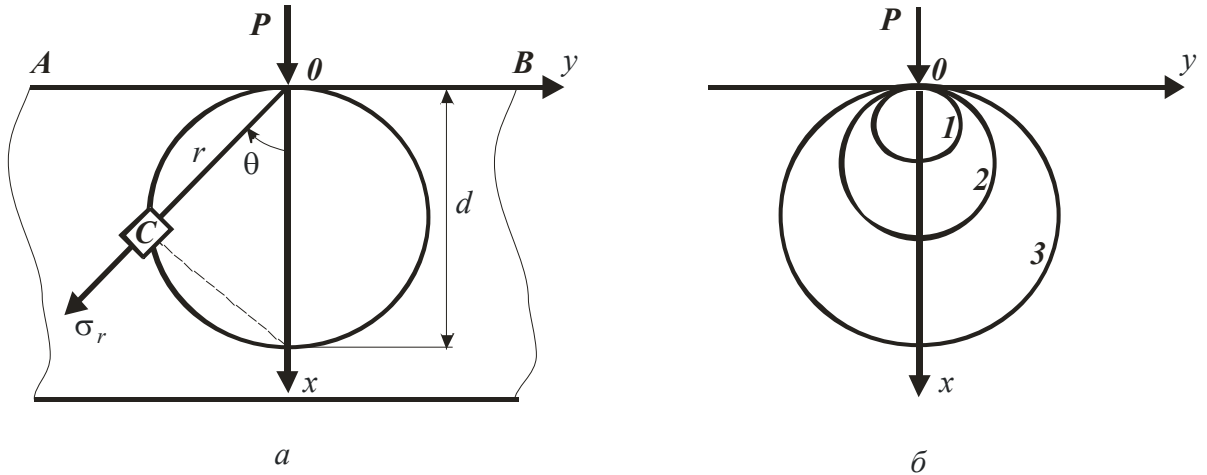


Рис. 1. Расчетная схема напряжений в полуплоскости (а) и положения окружностей одинаковых напряжений σ_r (б): $\sigma_{r1} > \sigma_{r2} > \sigma_{r3}$.

Для расчета напряжений в точке С от действия силы P (рис. 1,а) существует фундаментальное решение [5]

$$\varphi = -\frac{P}{\pi} \cdot r \cdot \theta \cdot \sin \theta. \quad (7)$$

С учетом зависимостей (3), (4) и (5) компоненты напряжений определяются

$$\sigma_r = -\frac{2 \cdot P}{\pi} \cdot \frac{\cos \theta}{r}; \quad (8)$$

$$\sigma_{\theta} = 0; \quad (9)$$

$$\tau_{r\theta} = 0. \quad (10)$$

Полученные зависимости (8), (9) и (10) удовлетворяют уравнениям (1), (2), (6) и граничным условиям на границе АВ ($\sigma_{\theta} = \tau_{r\theta} = 0$), рис. 1,а. При $\theta=0$ и $r=0$ выполняется условие $\sigma_r \rightarrow \infty$, т.е. из решения необходимо исключить точку приложения силы P . Из решения вытекает, что любой элемент С, расположенный на расстоянии r от точки приложения силы P , подвергается простому сжатию в радиальном направлении. С увеличением θ и r напряжение σ_r уменьшается.

Принимая $r = d \cdot \cos \theta$ (где d - диаметр окружности с центром на оси ОХ и касательной к оси ОУ в точке О, рис. 1,а), напряжение σ_r описывается

$$\sigma_r = -\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d}. \quad (11)$$

Следовательно, напряжение σ_r во всех точках окружности одинаково за исключением точки О, где $\sigma_r \rightarrow \infty$. Чем больше диаметр окружности d , тем меньше напряжение σ_r , рис. 1,б. Внутри окружности напряжение больше, чем снаружи.

При действии силы P в горизонтальном направлении решение остается прежним, однако угол θ необходимо отсчитывать от направления действия силы. При действии силы P под углом α напряжение σ_r определяется путем суперпозиции, раскладывая силу P на две составляющие $P \cdot \cos \alpha$ и $P \cdot \sin \alpha$ (в направлении осей ОХ и ОУ)

$$\sigma_r = -\frac{2}{\pi \cdot r} \left[P \cdot \cos \alpha \cdot \cos \theta + P \cdot \sin \alpha \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) \right] = -\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot r} \cdot \cos(\alpha + \theta). \quad (12)$$

Как видим, наибольшее напряжение σ_r достигается при условии $\cos(\alpha + \theta) = 1$, т.е. при $\theta = -\alpha$. Следовательно, центр окружности одинаковых напряжений σ_r (диаметром d) расположен на линии действия силы P . Данное решение идентично решению (8), рассматривая вместо угла φ угол θ .

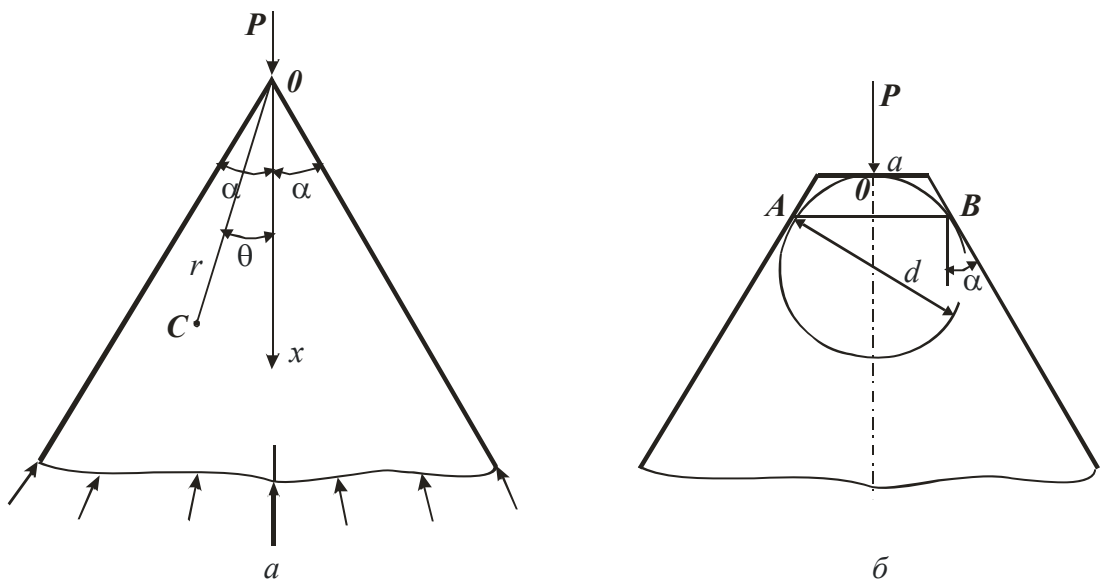


Рис. 2. Расчетные схемы напряжений в клине при действии радиальной силы P

Фундаментальное решение плоского напряженного состояния тела, описываемое зависимостями (7), (8), (9), (10), можно распространить для формы клина (рис. 2,а), представляя компоненты напряжений в виде [5]:

$$\sigma_r = \frac{k \cdot P \cdot \cos \theta}{r}; \quad (13)$$

$$\sigma_\theta = 0; \quad (14)$$

$$\tau_{r\theta} = 0, \quad (15)$$

где постоянная k выбирается из условия равновесия в точке О, т.е.

$$-2 \cdot \int_0^\alpha \sigma_r \cdot r \cdot \cos \theta \cdot d\theta = -P, \quad (16)$$

откуда

$$k = \frac{1}{(\alpha + 0,5 \cdot \sin 2\alpha)}; \quad (17)$$

$$\sigma_r = -\frac{P \cdot \cos \theta}{r \cdot (\alpha + 0,5 \cdot \sin 2\alpha)}. \quad (18)$$

Здесь 2α - угол раствора клина. При $\alpha = \pi/2$ значение $\sin 2\alpha = 0$ и зависимость (18) принимает вид зависимости (8). С уменьшением угла α напряжение σ_r увеличивается. Наибольшее значение σ_r достигается при $\theta=0$.

При действии силы, перпендикулярной оси клина, напряжение σ_r определяется аналогичным образом:

$$\sigma_r = -\frac{P \cdot \cos \theta}{r \cdot (\alpha - 0,5 \cdot \sin 2\alpha)}. \quad (19)$$

Наибольшее значение σ_r достигается при условии $\theta = \pi/2$, т.е. в направлении оси симметрии клина. При $\theta < \pi/2$ в клине возникают сжимающие напряжения, а при $\theta > \pi/2$ - растягивающие. При $r \rightarrow 0$ напряжение $\sigma_r \rightarrow \infty$. Следовательно, разрушению или пластическому деформированию в первую очередь будет подвергаться материал в вершине клина. Клинок примет форму, показанную на рис. 2,б.

Определим напряжения в клине, имеющем форму, показанную на рис. 2,б, от действия радиальной силы P , приложенной в точке О. Используя полученное выше аналитическое решение о распределении напряжений в клине, через точку О (рис. 2,б) проведем окружность одинаковых (предельных) напряжений σ_r , касающуюся граней клина. Наиболее вероятными направлениями разрушения клина следует рассматривать линии АО и ОВ, а также линию АВ. Диаметр окружности d определим из условия:

$$\frac{d}{2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{d}{2} + \frac{a}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}\right)} = \sin \alpha, \quad (20)$$

откуда

$$d = \frac{a \cdot \cos \alpha}{(1 - \sin \alpha)}, \quad (21)$$

где a - длина верхнего основания клина.

Положение линий АО и ОВ определяется углом β :

$$\beta = 45^\circ - \frac{\alpha}{2}. \quad (22)$$

Чем больше длина a , тем больше диаметр окружности d и в соответствии с зависимостью (11), сила P при заданном (предельном) значении напряжения σ_r . Угол β зависит лишь от угла α . Большому значению угла α соответствует меньшее значение угла β . При условии $\alpha \rightarrow \pi/2$ угол $\beta \rightarrow 0$, т.е. максимальное напряжение σ_r достигается в направлении действия силы P .

По физической сути сила P равна радиальной составляющей силы резания P_{y1} , действующей на отдельное зерно круга при шлифовании. С ее увеличением увеличиваются параметры d и a , т.е. увеличивается объем разрушенной (путем микросколов) части режущего зерна. Предельное значение P_{y1} определяется собственно прочностью зерна или прочностью удержания его в связке круга. Поэтому, чем прочнее зерно и связка круга, тем больше может быть объем разрушенной части зерна в результате его поверхностного разрушения при шлифовании.

Рассмотрим случай, когда сила P приложена не в вершине, а на одной из граней режущего клина (режущего клина зерна) под некоторым углом φ , рис. 3. Этот случай соответствует реальным условиям шлифования. Окружность одинаковых напряжений радиусом r , проведенная через точку действия силы P , будет касаться противоположной грани режущего клина зерна в точке A . При достижении в каждой точке окружности одинаковых напряжений радиусом r предельного значения напряжения, произойдет разрушение режущего зерна. Наиболее вероятно, что разрушение произойдет вдоль линии OA , расположенной под углом ψ к горизонтальной линии OC .

После несложных тригонометрических преобразований установлено, что угол ψ , определяющий положение линии OA , равен

$$\psi = 0,5 \cdot (\varphi - \alpha). \quad (23)$$

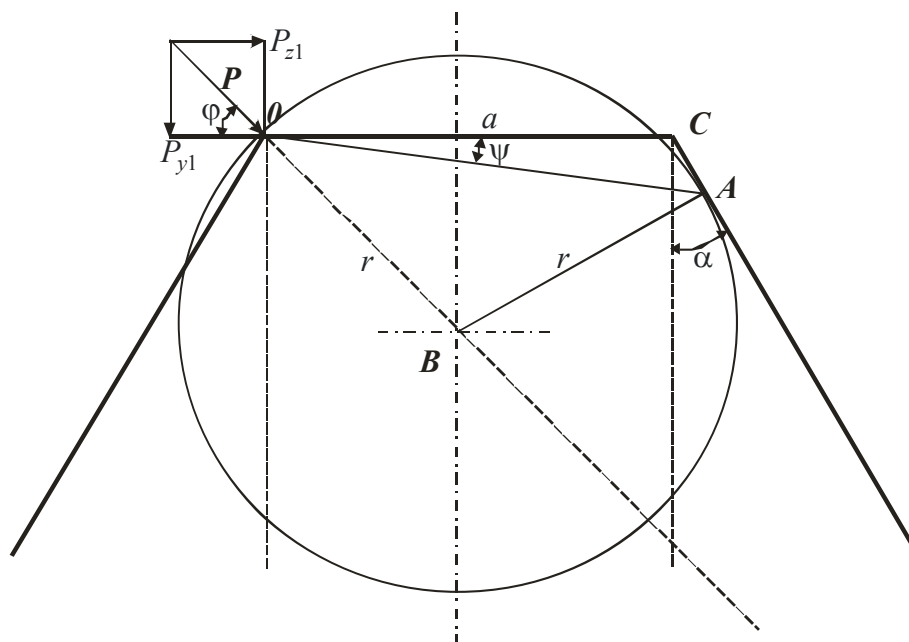


Рис. 3. Расчетная схема напряжений в режущем клине зерна

Из зависимости (23) следует, что при условии $\varphi = \alpha$ угол $\psi = 0$, т.е. разрушение режущего клина (режущего зерна) произойдет в направлении действия тангенциальной составляющей силы резания P_{z1} , действующей на отдельное зерно круга при шлифовании. Например, при $\varphi = \alpha = 60^\circ$ отношение сил P_{z1}/P_{y1} ,

определяющее по физической сути коэффициент шлифования $K_{ш}$, равно:
 $K_{ш} = P_{z1} / P_{y1} = ctg\varphi = 0,577$.

Как установлено экспериментально, коэффициент шлифования $K_{ш}$ в процессе шлифования изменяется в меньших пределах (0,1...0,4). Поэтому и угол φ должен принимать большие значения ($\varphi > 60^\circ$). Это указывает на то, что угол ψ , исходя из зависимости (23), принимает значения, которые незначительно больше нуля. Следовательно, разрушение режущего зерна происходит практически вдоль действия линии тангенциальной составляющей силы резания P_{z1} , действующей на отдельное зерно круга.

Этим можно объяснить то, что в реальных условиях процесса шлифования режущая часть зерна принимает форму, близкую к симметричной (рис. 2,а). По этой причине верхнее основание зерна длиной a принято называть “площадка износа”, хотя в действительности данная форма режущей части зерна не всегда формируется в процессе его износа, а как показано выше, формируется в результате микроразрушений (микросколов).

Из зависимости (23) следует, что с увеличением угла φ (с увеличением радиальной составляющей силы резания P_{y1} , действующей на отдельное зерно), угол ψ увеличивается. Фактический угол заострения зерна, равный $[\alpha + (90^\circ - \psi)]$, уменьшается, что с физической точки зрения повышает остроту зерна и режущую способность круга.

В таблице приведены рассчитанные по зависимости (23) значения угла ψ для предельного условия $\varphi = 90^\circ$.

Таблица

Расчетные значения угла ψ

α , град	30	45	60	70	80
ψ , град	30	22,5	15	10	5

Следует отметить, что уменьшение фактического угла заострения режущего зерна (с увеличением угла φ) снижает прочность зерна. Это создает объективные предпосылки образования микросколов зерен при шлифовании и обеспечения условий более устойчивой работы круга в режиме самозатачивания, т.е. устойчивой работы алмазного круга в течение продолжительного времени обработки, что способствует повышению производительности и качества обработки.

Список литературы: 1. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки: Учеб. пособие / Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов А.А. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 212 с. 2. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. – Харьков: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1985. – 184 с. 3. Мишинаевский Л.Л. Износ шлифовальных кругов. – К.: Наук. думка, 1982. – 192 с. 4. Мишинаевский Л.Л., Федосеев О.Б. О механизме износа зерен шлифовальных кругов. – Синтетические ал-

мазы, вып. 1, 1979. – С. 34-38. **5.** Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – Редакция физико-математической литературы. Изд. “Наука”. – 1975. – 576 с. **6.** Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. ”Механика резания материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.

Поступила в редколлегию 25.10.04