УДК 621.923

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

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РЕЖУЩЕГО ЗЕРНА АЛМАЗНОГО КРУГА ПРИ ШЛИФОВАНИИ

В работе проведен анализ напряженного состояния режущего зерна (в форме конуса и шара) алмазного круга при шлифовании

В роботі наведено аналіз напруженого стану ріжучого зерна (в формі конусу і шару) алмазного кругу при шліфуванні

Эффективность применения алмазного шлифования при съеме относительно больших припусков труднообрабатываемых материалов обусловлена, главным образом, интенсивностью износа круга, который, как установлено в работах [1−4], связан с механическим разрушением режущих зерен. Поэтому при выборе оптимальных условий обработки важно знать закономерности разрушения зерен на основе исследований их напряженного состояния при резании. Данному вопросу посвящены работы [2, 5, 7, 8, 9], в которых предложены различные расчетные схемы напряженного состояния алмазных зерен. Однако в полном объеме задачи не решены. Цель работы − проведение дальнейших исследований формирования механических напряжений в алмазных зернах с использованием методов теории упругости.

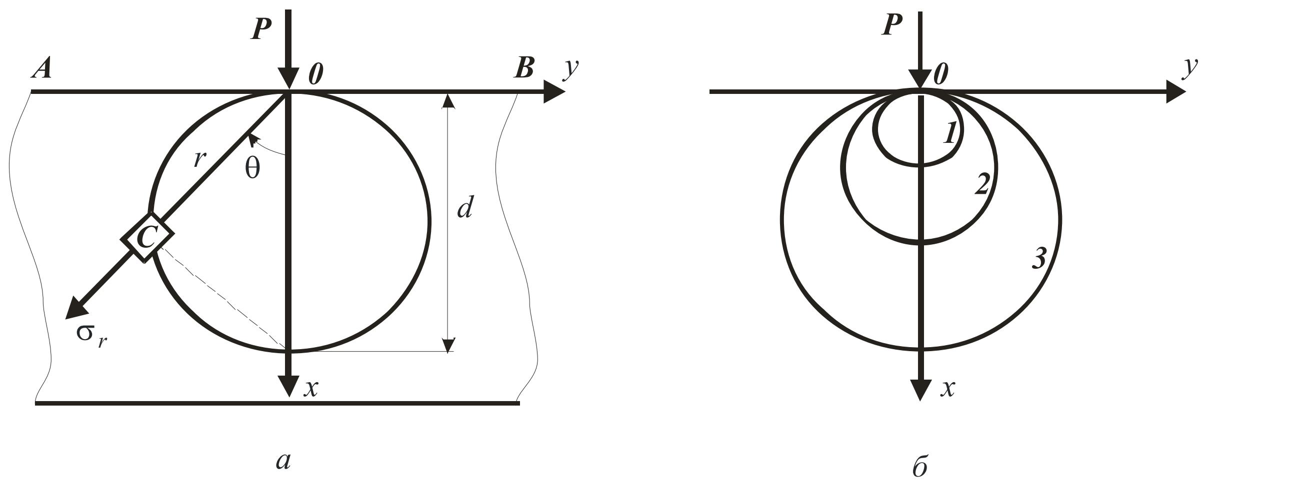

Рисунок 1 − Расчетная схема напряжений в полуплоскости (а) и положения окружностей одинаковых напряжений σ_r (б): $\sigma_{r1} > \sigma_{r2} > \sigma_{r3}$.

В работе [6] приведено фундаментальное решение о распределении компонент напряжений в полуплоскости (в точке С, рис. 1,а) от действия сосредоточенной силы P на прямолинейной границе полуплоскости (в полярной системе координат):

$$\sigma_r = -\frac{2 \cdot P}{\pi} \cdot \frac{cos\,\theta}{r}\,, \qquad \sigma_\theta = 0\,, \qquad \tau_{r\theta} = 0\,, \qquad (1)$$

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.

При θ=0 и r=0 выполняется условие $\sigma_r \to \infty$, т.е. из решения необходимо исключить точку приложения силы P. Из решения вытекает, что любой элемент С, расположенный на расстоянии r от точки приложения сосредоточенной 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 OY в точке О, рис.1,а), напряжение σ_r описывается

$$\sigma_r = -\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d} . \tag{2}$$

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

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

Определим напряжения в полуплоскости, возникающие от действия распределенной нагрузки на прямолинейной границе полуплоскости.
Предположим, на прямолинейную границу действует равномерно распределенная нормальная нагрузка интенсивностью $q = P / l$, рис. 2.

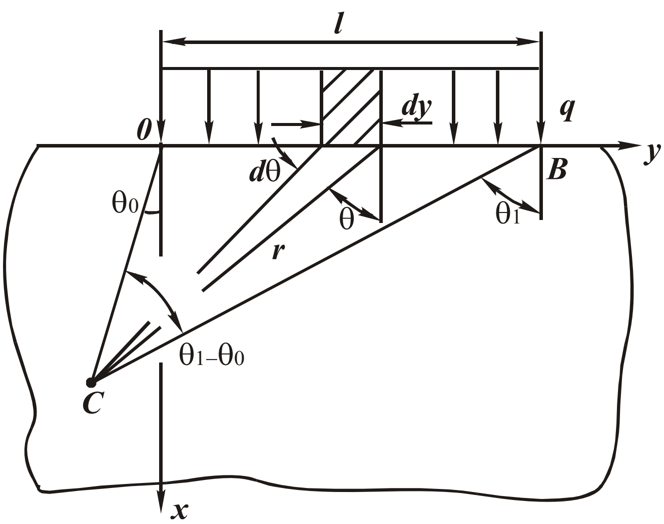

Рисунок 2 − Расчетная схема напряжений от действия распределенной нагрузки q на границе полуплоскости.

Напряжение $d\sigma_r$ от элементарной силы $dP = q \cdot dy$ в точке С равно

$$d\sigma_r = -\frac{2 \cdot q \cdot dy \cdot cos\theta}{\pi \cdot r}, \tag{3}$$

где $dy = \frac{r \cdot d\theta}{cos\theta}$ - элементарная площадка; $d\theta$ - элементарный угол, тогда

$$d\sigma_r = -\frac{2 \cdot q}{\pi} \cdot d\theta. \tag{4}$$

Составляющая напряжения $d\sigma_r$ в направлении линии ОС, расположенной под углом θ_o к оси ОХ, равна

$$\overline{d\sigma_r} = d\sigma_r \cdot cos(\theta - \theta_o) = -\frac{2 \cdot q}{\pi} \cdot cos(\theta - \theta_o) \cdot d\theta. \tag{5}$$

Интегрируя $\overline{d\sigma_r}$ в пределах $\theta = \theta_o ... \theta_1$, имеем

$$\sigma_r = -\frac{2 \cdot q}{\pi} \cdot sin(\theta - \theta_o). \tag{6}$$

От зависимости (6) несложно перейти к зависимости (1). Для этого примем $l = dy$ $(l \to 0)$, где $dy = \frac{r \cdot d\theta}{cos\theta}$; $d\theta = \theta_1 - \theta_o$, так как $\theta_1 - \theta_0 \to 0$.

Тогда с учетом $sin(\theta_1 - \theta_0) \approx \theta_1 - \theta_0$, $q = \frac{P}{l}$ зависимость (6) принимает вид (1). При $\theta_o = 0$ напряжение σ_r, исходя из зависимости (6), равно

$$\sigma_r = -\frac{2 \cdot q}{\pi} \cdot sin\theta_1. \tag{7}$$

С увеличением угла θ_1 от 0 до 90° напряжение σ_r возрастает от 0 до значения $(-\frac{2 \cdot q}{\pi})$. В отличие от решения, полученного для сосредоточенной силы, в данном решении напряжение σ_r принимает конечное значение.

Условно угол $(\theta_1 - \theta_o)$ является углом треугольника, вписанного в окружность диаметром D_o. Основание треугольника равно l. Из планиметрии известно, что вписанный угол составляет половину центрального угла φ, опирающегося на ту же дугу окружности. Следовательно, все углы, опирающиеся на данную дугу, равны между собой.

Напряжение σ_r для данного угла $\theta_1 - \theta_o$, постоянно. Положения окружностей, определяемых из условия $\theta_1 - \theta_o = const$, показано на рис. 3. Максимальное напряжение достигается в точках полуокружности диаметром $D = l$. В точках О и В напряжение σ_r равно

$$\sigma_r = -\frac{2 \cdot q}{\pi}. \tag{8}$$

С увеличением нагрузки q напряжение σ_r возрастает. При достижении в полуокружности диаметром $D = l$ предельного напряжения $\sigma_r = \sigma_{сж}$ (где $\sigma_{сж}$ - предел прочности материала на сжатие, Па) произойдет разрушение материала в виде местного выкрашивания. Данный вид разрушения типичен для контактируемых поверхностей деталей машин.

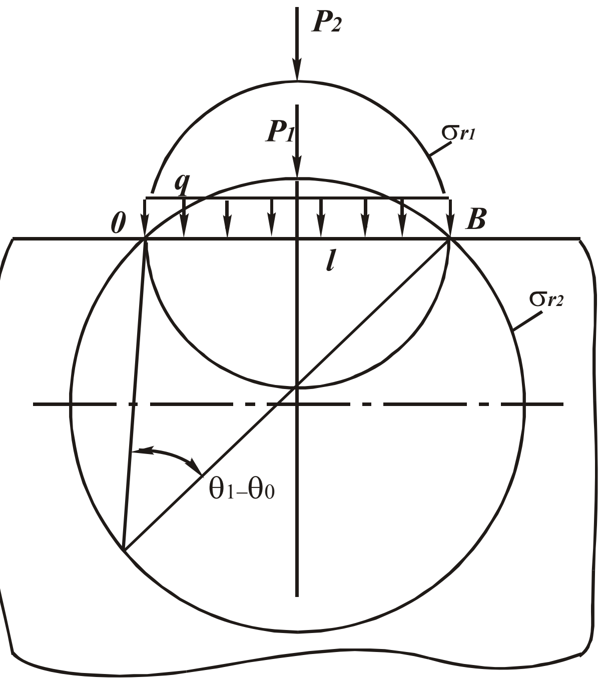

Рисунок 3 − Положения окружностей одинаковых напряжений ($\sigma_{r_1} > \sigma_{r_2}$).

Нагрузка q должна как минимум в 1,57 раз превышать значение $\sigma_{сж}$.

С учетом $\varphi = 2 \cdot (\theta_1 - \theta_o)$ справедливо соотношение

$$\frac{l/2}{D/2} = sin\frac{\varphi}{2} = sin(\theta_1 - \theta_o) = \frac{l}{D}. \tag{9}$$

Тогда зависимость (6) принимает вид

$$\sigma_r = -\frac{2 \cdot q}{\pi} \cdot \frac{l}{D}. \tag{10}$$

Рассматривая $q = P / l$, приходим к решению (2) при условии $D = d$.

Применим полученные решения для расчета напряжений в режущей части зерна, представленной в форме усеченного конуса. Под действием сосредоточенной силы P, приложенной на площадке, удаленной от вершины зерна (вершины конуса) на некотором расстоянии, в зерне возникают нормальные напряжения, которые могут быть аналитически описаны окружностями одинаковых напряжений σ_r (рис. 4) в соответствии с зависимостью (2). Предположим, что в точках фиксированной окружности одинаковых напряжений, касающейся граней зерна, возникают предельные напряжения сжатия $\sigma_{сж}$. Тогда наиболее вероятным направлением образования сколов зерна будут прямые линии ОА и ОВ.

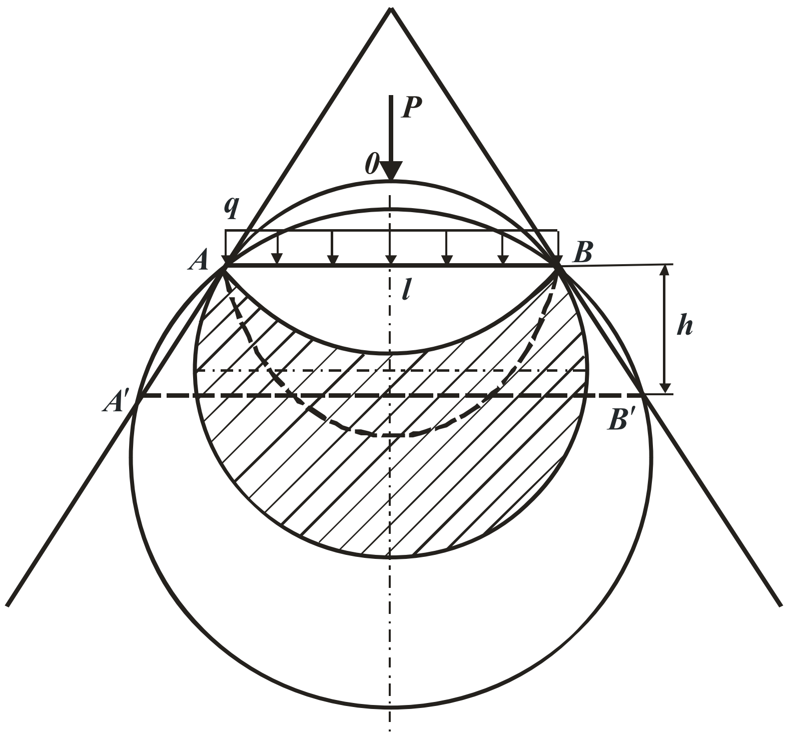

Рисунок 4 − Расчетная схема напряжений в зерне, представленном в виде конуса.

Положение линии одинаковых значений напряжения σ_r будет таким же и в случае действия распределенной нагрузки $q = P / l$ на площадке зерна, проходящей через точки А и В. Предельные напряжения достигаются в заштрихованной области, ограниченной двумя дугами АВ окружности диаметром D, а наибольшие напряжения − в точках окружности диаметром l (пунктирная линия).

С увеличением распределенной нагрузки q диаметр окружности D, в точках которой достигаются предельные напряжения, увеличиваются. Это приведет к разрушению нижней части зерна толщиной h и перемещению площадки, на которой действует распределенная нагрузка q, в новое положение $A'B'$. Учитывая то, что наибольшие напряжения σ_r достигаются в точках окружности диаметром $D=l$, расчет напряжений (в двухмерной системе координат) следует вести по зависимости (10) для случая $D=l$:

$$\sigma_r = \frac{2 \cdot q}{\pi} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l}. \qquad (11)$$

В трехмерной системе координат зависимость (11) примет вид:

$$\sigma_r = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l^2}. \qquad (12)$$

Задавая значения $\sigma_r = \sigma_{сж}$ и l, из зависимости (12) можно определить предельную (разрушающую) силу P.

Исходя из упрощенного расчета сжатия силой P стержня толщиной l, напряжение в двухмерной системе координат определится:

$$\sigma = \frac{P}{l}. \qquad (13)$$

В трехмерной системе координат зависимость (13) выразится:

$$\sigma = \frac{P}{l^2}\,. \qquad (14)$$

Как видим, отличие зависимостей (11) и (13), а так же зависимостей (12) и (14) не существенно, что позволяет в первом приближении использовать упрощенные зависимости (13) и (14).

Если рассматривать режущее зерно в форме шара (рис. 5), находящегося под действием сосредоточенной силы P, то при условии совпадения диаметра окружности одинакового напряжения $\sigma_r = \sigma_{сж}$ с диаметром окружности, описывающей контур шара (зерна), произойдет его разрушение. В этом случае в зависимостях (11) и (12) необходимо принять $l = \overline{X}$, где $\overline{X}$ – зернистость алмазного порошка, мкм.

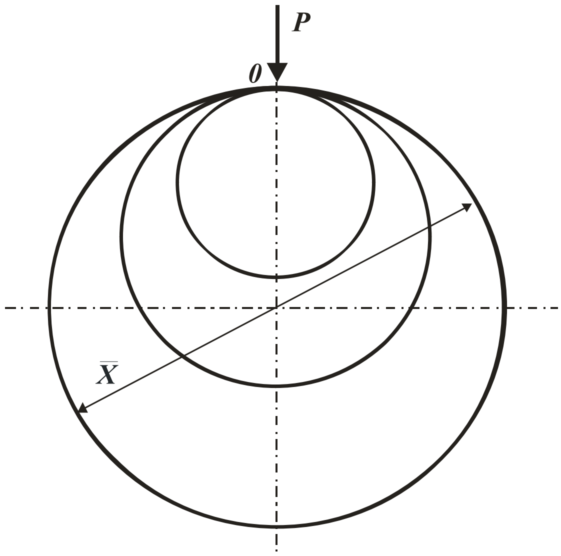

Рисунок 5 − Расчетная схема напряжений в зерне, представленном в виде шара.

Таким образом, в работе предложен подход к расчету напряжений в режущем зерне, представленном в форме конуса и шара, на основе методов теории упругости.

Список литературы: **1.** Синтетические алмазы в машиностроении / Под ред. *В.Н. Бакуля.* – К.: Наук. думка, 1976. – 351 с. **2.** Качество и производительность абразивно-алмазной обработки: Учебное пособие / *А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, А.А. Якимов.* – Одесса: ОГПУ, 1999. – 212 с. **3.** *Грабченко А.И.* Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. – Харьков: Высш. шк., 1985. – 184 с. **4.** *Мишнаевский Л.Л.* Износ шлифовальных кругов. – К.: Наук. думка, 1982. – 192 с. **5.** *Мишнаевский Л.Л., Федосеев О.Б.* О механизме износа зерен шлифовальных кругов // Синтет. алмазы, вып. 1, 1979. – С. 34-38. **6.** *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости. – Редакция физико-математической литературы. Изд. "Наука". – 1975. – 576 с. **7.** Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией *Ф.В. Новикова и А.В. Якимова.* В десяти томах. – Т.1. "Механика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. **8.** *Новиков Ф.В., Ковальчук А.Н.* Условия разрушения режущих зерен алмазного круга при шлифовании // Вісник НТУ"ХПІ", 2004, №44. − С. 111-117. **9.** Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / *А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов.* − Одесса: ОГПУ, 1999. − 450 с.