

**НОВИКОВ Ф.В.**, докт. техн. наук, проф., ХНЭУ, Харьков

**КЛЕНОВ О.С.**, канд. техн. наук, ООО Фирма “ДиМерус

Инженеринг”, Харьков

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

**Вступление.** Обработка металлов резанием, по-прежнему, является основным методом формообразования поверхностей деталей машин, обеспечивающим высокие показатели качества, точности и производительности обработки. Особенно это относится к процессам резания инструментами из синтетических сверхтвёрдых материалов и с износостойкими покрытиями, которые обладают высокой режущей способностью и стойкостью. Это позволяет существенно уменьшить силы и температуру резания, повысить качество и точность обрабатываемых поверхностей. Вместе с тем, для эффективного использования данных инструментов необходимо знать их технологические возможности и оптимальные условия обработки. Это требует разработки более совершенной методики расчета силы резания, являющейся, по сути, основным параметром процесса резания.

**Анализ последних исследований и литературы.** В научно-технической литературе приведены теоретические решения по определению силы резания при механической обработке [1-3]. Однако они получены на основе упрощенного представления процесса резания с позиции сопротивления материалов. Поэтому важно их уточнить с позиции теории упругости. Это позволит научно обоснованно подойти к решению задач по совершенствованию процесса и расширению его технологических возможностей, т.к. для решения данных задач важно располагать глубокими знаниями о физической сущности процесса и условиях снижения его силовой напряженности.

**Цель исследования, постановка проблемы.** Цель работы – определение силы резания при механической обработке и условий ее уменьшения. Для этого решается проблема аналитического определения силы резания с использованием фундаментальных методов теории упругости.

**Материалы исследований.** В основу работы положено фундаментальное решение о распределении напряжений в полуплоскости от действия на ее границе сосредоточенной силы  $P$  (приходящейся на единицу ширины, рис. 1) [4]:

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

где  $\sigma_r$  – нормальная компонента напряжений в радиальном направлении;  $\sigma_\theta$  – нормальная компонента напряжений в окружном направлении;  $\tau_{r\theta}$  – касательная компонента напряжений;  $\theta$  – угол;  $r$  – радиус-вектор.

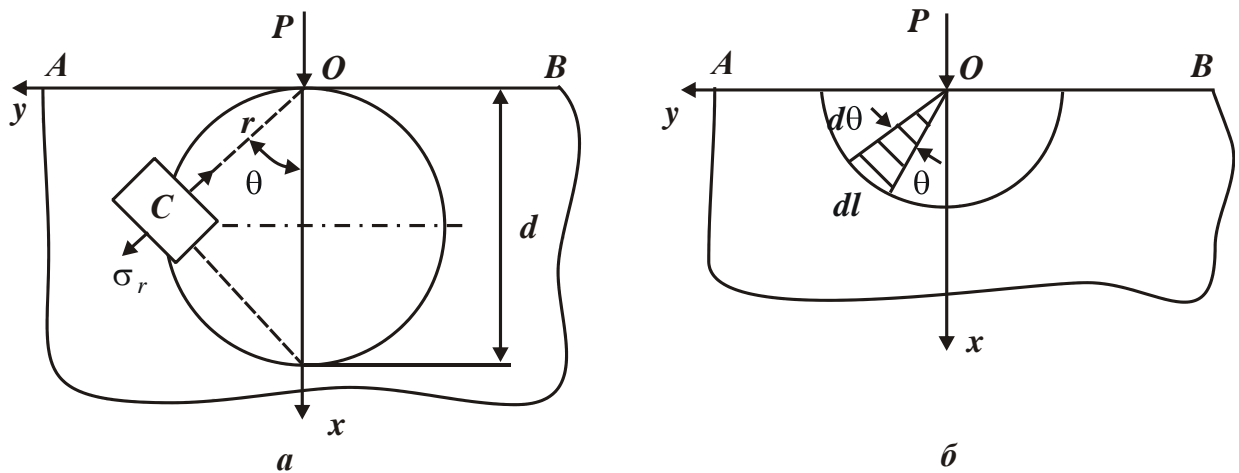


Рис. 1 – Расчетная схема напряжений от действия сосредоточенной силы  $P$   
 Данные зависимости удовлетворяют условиям равновесия (рис. 2) [4]:

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

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2 \cdot \tau_{r\theta}}{r} = 0, \quad (3)$$

уравнению совместности:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \cdot \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} \right) = 0 \quad (4)$$

и граничным условиям на границе АВ ( $\sigma_\theta = \tau_{r\theta} = 0$ ).

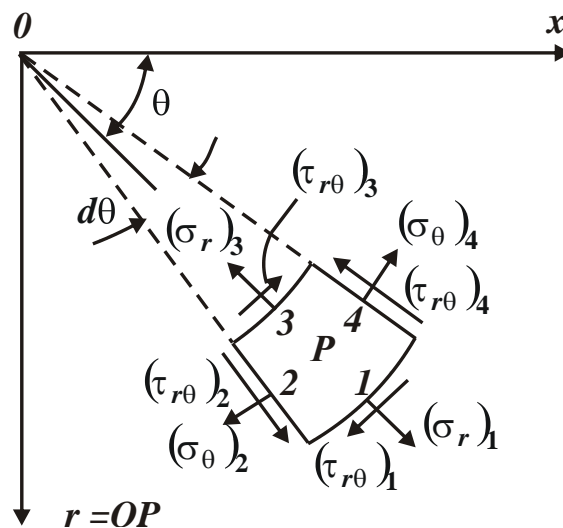


Рис. 2 – Расчетная схема напряженного состояния тела

При условии  $\theta = 0$  и  $r = 0$  напряжение  $\sigma_r \rightarrow \infty$ , т.е. из решения необходимо исключить точку приложения силы  $P$ . Из решения (1) вытекает, что любой элемент  $C$ , расположенный на расстоянии  $r$  от точки приложения силы  $P$ , подвергается простому сжатию в радиальном направлении. С увеличением  $\theta$  и  $r$

напряжение  $\sigma_r$  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  $\sigma_r$  описывается

$$\sigma_r = -\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d}. \quad (5)$$

Следовательно, напряжение  $\sigma_r$  во всех точках окружности одинаково за исключением точки приложения силы, где  $\sigma_r \rightarrow \infty$ . Чем больше диаметр окружности  $d$ , тем меньше напряжение  $\sigma_r$ . Очевидно, внутри окружности напряжение больше, чем снаружи. Используя данное решение, установим параметры силовой напряженности процесса резания для нулевого переднего угла режущего инструмента (рис. 3). Учитывая, что образование стружки происходит в результате периодических сдвигов элементов обрабатываемого материала вдоль условной плоскости сдвига ОА (расположенной под условным углом сдвига материала  $\beta$ ), определим касательное напряжение  $\tau$  в плоскости сдвига ОА:

$$\tau = \frac{P \cdot \cos(\beta + \psi)}{b \cdot r}, \quad (6)$$

где  $P$  – равнодействующая силы резания, Н;  $\psi$  – условный угол трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента;  $\operatorname{tg} \psi = f$  – коэффициент трения обрабатываемого и инструментального материалов;  $b$  – ширина среза, м;  $r$  – текущее значение длины условной плоскости сдвига материала ОА, в пределах которой касательное напряжение  $\tau$  одинаково.

В расчетной схеме, показанной на рис. 3,а, рассмотрим прямоугольный треугольник  $OA'B$ , в котором  $OA' = r$ , а угол  $OA'B$  равен  $90^\circ$ . Тогда справедлива зависимость

$$d = \frac{r}{\cos(\beta + \psi)}, \quad (7)$$

где  $d$  – длина отрезка  $OB$ .

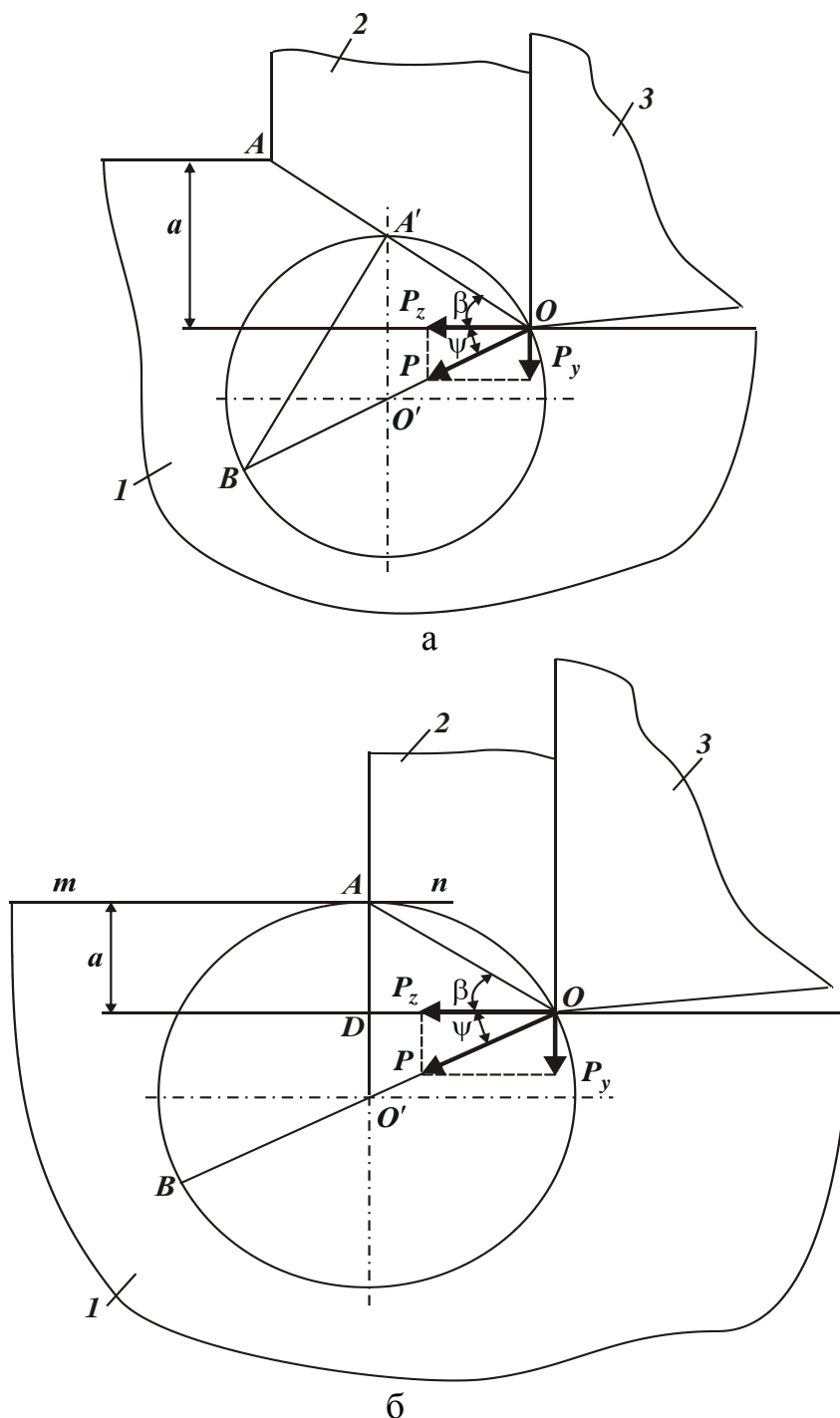


Рис. 3 – Расчетные схемы условного угла сдвига материала  $\beta$  при резании:  
 1 – материал; 2 – стружка; 3 – режущий инструмент.

Проведем через три точки  $O$ ,  $A'$  и  $B$  окружность, т.е. окружность, описывающую прямоугольный треугольник  $OA'B$ . Как известно, данная окружность подчиняется следующим свойствам [4]: а) все вписанные в окружность углы, опирающиеся на одну и ту же дугу, равны между собой; б) вписанный угол определяется половиной дуги, на которую он опирается. Из сказанного вытекает, что поскольку угол  $OA'B$  равен  $90^\circ$ , то длина отрезка  $OB$  равна диаметру окружности  $d$ , проведенной через точки  $O$ ,  $A'$  и  $B$ . Исходя из этого зависимость (б) может быть выражена через диаметр окружности  $d$ :

$$\tau = \frac{P}{\sigma \cdot d} . \quad (8)$$

Физический смысл полученного решения состоит в том, что касательное напряжение  $\tau$  в каждой точке круга диаметром  $d$  одинаково и зависит от значений  $P$  и  $d$ . Как видно, касательное напряжение  $\tau$  тем больше, чем больше сила резания  $P$  и меньше диаметр окружности  $d$ .

Из условия  $\tau = \tau_{\text{сдв}}$  для заданного значения  $P$  можно определить предельное значение диаметра окружности  $d$ , при котором произойдет разрушение обрабатываемого материала.

**Результаты исследования.** Применим данное решение для определения положения условной плоскости сдвига материала  $OA$  (рис. 3,б) и условного угла сдвига материала  $\beta$  при резании инструментом с передним углом, равным нулю. Для этого проведем окружность диаметром  $d$  с центром в точке  $O'$ , расположенной на линии действия силы резания  $P$ . Окружность должна касаться границы обрабатываемого материала, определяемой положением линии  $mn$ . Предположим, что выполняется условие:

$$\tau = \tau_{\text{сдв}} = \frac{P}{\sigma \cdot d} . \quad (9)$$

Это означает, что в каждой точке круга диаметром  $d$  касательное напряжение  $\tau$  равно пределу прочности на сдвиг обрабатываемого материала  $\tau_{\text{сдв}}$ . Следовательно, внутри круга диаметром  $d$  возможно разрушение обрабатываемого материала. Вполне очевидно, что разрушение материала произойдет вдоль плоскости  $OA$ , т.е. условной плоскостью сдвига будет плоскость  $OA$ , расположенная под углом  $\beta$  к направлению движения инструмента (или обрабатываемой детали).

Условный угол сдвига материала  $\beta$  можно определить, рассматривая равнобедренный треугольник  $OAO'$ , в котором стороны  $AO'$  и  $OO'$  равны радиусу окружности  $r = d/2$ . Из этого следует, что угол  $OAO'$  равен углу  $AOO'$ , т.е. угол  $OAO'$  равен  $(\beta + \psi)$ . Угол  $AO'O$  равен  $(90^\circ - \psi)$ , поскольку линия  $OA$  перпендикулярна линии  $mn$  и угол  $O'DO$  равен  $90^\circ$ . Как известно, сумма углов треугольника равна  $180^\circ$ , тогда

$$(90^\circ - \psi) + 2 \cdot (\beta + \psi) = 180^\circ , \quad \text{откуда} \quad (10)$$

$$\beta = 45^\circ - \frac{\psi}{2} . \quad (11)$$

Определим диаметр окружности  $d$  исходя из условия:

$$AD + DO' = \frac{d}{2}, \quad (12)$$

где  $AD = a$  – толщина среза;  $DO' = OO' \cdot \sin \psi = d / 2 \cdot \sin \psi$ .

После преобразования зависимости (12), имеем

$$d = \frac{2a}{(1 - \sin \psi)}. \quad (13)$$

Как видно, диаметр окружности  $d$  тем больше, чем больше толщина среза  $a$  и условный угол трения образующей стружки с передней поверхностью инструмента  $\psi$ . Наименьший диаметр окружности  $d$  достигается при  $\psi = 0$ , т.е. при отсутствии трения образующей стружки с передней поверхностью инструмента. В этом случае  $d = 2a$  или  $a = d / 2$  (рис. 4). Условный угол сдвига материала  $\beta$ , определяемый (11), равен  $45^\circ$ .

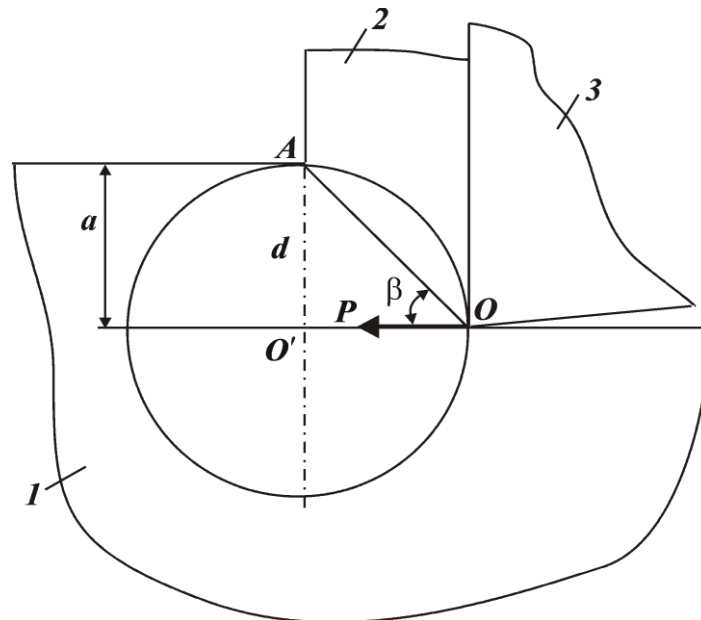


Рис. 4 – Расчетная схема угла  $\beta$  при резании для случая  $\psi = 0$ :  
1 – обрабатываемый материал; 2 – стружка; 3 – инструмент

Располагая зависимостью для определения диаметра окружности  $d$ , на основе зависимости (9) можно рассчитать силу резания  $P$ :

$$P = \sigma \cdot d \cdot \tau_{сдв} = \frac{2a \cdot \sigma \cdot \tau_{сдв}}{(1 - \sin \psi)}. \quad (14)$$

Таким образом показано, что использование окружности одинаковых напряжений позволяет наглядно проанализировать условия формирования условного угла сдвига материала  $\beta$  и параметров силовой напряженности процесса резания. Сравнивая зависимости (5) и (8) видно, что они отличаются

лишь множителем  $2/\pi$ . Следовательно, все выводы, сделанные на основе анализа зависимости (5), остаются справедливыми и применительно к зависимости (8).

Из зависимости (14) следует, что уменьшить силу резания  $P$  можно уменьшением параметров  $a$ ,  $v$ ,  $\tau_{сдв}$  и  $\psi$ . Основным параметром в данном случае является толщина среза  $a$ , которую можно изменять в широких пределах. Условный угол трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента  $\psi$  может изменяться в пределах  $0...45^{\circ}$ , что позволяет изменять выражение  $(1 - \sin \psi)$  в пределах  $0,3...1,0$ . Естественно, этого не достаточно для того, чтобы существенно уменьшить силу резания  $P$ . Из этого следует, что при резании труднообрабатываемых материалов сложно уменьшить силу резания  $P$  и таким образом снизить износ инструмента. Поэтому основным путем повышения эффективности механической обработки (в том числе процесса разрезки материалов) следует рассматривать увеличение прочности и износостойкости режущей части инструмента путем применения более прочных инструментальных материалов (например, твердых сплавов) с нанесенными на них износостойкими покрытиями, позволяющими повысить ресурс работы режущего инструмента [5].

**Заключение.** В работе на основе теоретических исследований параметров силовой напряженности механической обработки показано, что основным направлением совершенствования процесса разрезки материалов является применение режущих инструментов, обладающих повышенной прочностью, твердостью и износостойкостью. Добиться такой же эффективности обработки за счет оптимизации режимов резания значительно сложнее. Поэтому в дальнейшем важно определить условия повышения прочности режущей части инструмента.

**Список литературы:** 1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с. 2. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с. 3. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов / С.С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с. 4. Тимошенко С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Ред. физ.-мат. лит. Изд. "Наука", 1975. – 576 с. 5. Системи технологій. Навчальний посібник / В.Г. Шкурупій, Ф.В. Новіков, Ю.В. Шкурупій. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2008. – 280 с.

Поступила в редколлегию 20.10.2012