

**О. С. КЛЕНОВ**, канд. техн. наук, Фирма “ДиМерус Инженеринг”, Харьков;  
**Ф.В. НОВИКОВ**, докт. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;  
**А.Г. КРЮК**, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков

## **АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ РЕЗАНИЯ И УСЛОВИЙ ЕЕ УМЕНЬШЕНИЯ**

В работе рассмотрены различные теоретические подходы к определению силы резания лезвийным инструментом. Показано, что в конечном итоге они сводятся к единому решению, из которого определены основные условия уменьшения силы резания, состоящие в уменьшении разности условного угла трения на передней поверхности инструмента и переднего угла инструмента. Показано также, что в случае увеличения разности этих углов до значения, равного  $90^0$ , сила резания неограниченно увеличивается. Это свидетельствует о высокой силовой напряженности процесса шлифования, характеризующегося значительными отрицательными передними углами режущих зерен. Установлено, что при резании лезвийными инструментами тангенциальная составляющая силы резания больше радиальной составляющей силы резания, а при шлифовании, наоборот, меньше.

**Ключевые слова:** процесс резания, лезвийный инструмент, резец, обрабатываемый материал, стружка, сила резания, касательное напряжение

**Введение.** В настоящее время на финишных операциях обработки деталей машин все шире используются методы резания лезвийными инструментами, обеспечивающими высококачественную обработку за счет снижения силовой напряженности процесса резания. На ряде операций они успешно конкурируют с методами шлифования, которые в силу наличия трения связки круга с обрабатываемым материалом приводят к высокой тепловой напряженности процесса резания и появлению на обрабатываемых поверхностях деталей прижогов, микротрещин и других дефектов. Чтобы эффективно управлять процессом резания лезвийным инструментом, необходимо располагать теоретическими решениями о силовой напряженности процесса резания, т.е. знать характер изменения силы резания и условия ее уменьшения.

**Анализ последних достижений и литературы.** Определению силы резания посвящены многочисленные теоретические исследования [1-3], выполненные на основе как упрощенных подходов сопротивления материалов, так и уточненных подходов теории упругости. Однако в полной мере данная задача не решена из-за ее сложности. Имеются лишь частные решения, справедливые для отдельных условий обработки. Вместе с тем, все возрастающие требования к повышению эффективности процессов резания лезвийными инструментами труднообрабатываемых материалов предопределяет необходимость знания закономерностей уменьшения силовой

© Кленов О.С., Новиков Ф.В., Крюк А.Г., 2014

напряженности процесса резания с целью повышения качества и производительности обработки, стойкости инструмента. В связи с этим важно провести теоретический анализ силы резания и условий ее уменьшения.

**Цель работы, постановка проблемы.** Целью работы является обоснование условий уменьшения силовой напряженности процесса резания на основе аналитического определения силы резания лезвийным инструментом.

**Материалы исследований.** Для решения поставленной задачи рассмотрим основные подходы к определению силы резания лезвийным инструментом.

1. Классическое решение об условии разрушения прямолинейного бруса (пластины) от действия двух сжимающих сил  $P$  (рис. 1).

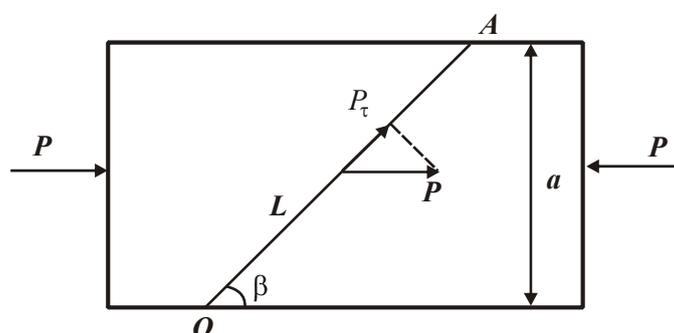


Рис. 1 – Расчетная схема

Касательное напряжение  $\tau$ , возникающее в плоскости ОА длиной  $L = a / \sin \beta$ , расположенной под углом  $\beta$ , от силы  $P_\tau = P \cdot \cos \beta$ , равно

$$\tau = \frac{P_\tau}{b \cdot L} = \frac{2P \cdot \sin 2\beta}{a \cdot b}, \quad (1)$$

где  $a, b$  – толщина и ширина пластины, м.

Наибольшее значение  $\tau$  достигается при условии  $\sin 2\beta = 1$ , т.е. при  $\beta = 45^\circ$ .

Определим силу  $P$ , при которой происходит разрушение пластины (достижение в плоскости ОА предела прочности материала на сдвиг  $\tau_{сдв}$ , т.е.  $\tau = \tau_{сдв}$ ). Подставляя в (1) значение  $\beta = 45^\circ$  и  $\tau = \tau_{сдв}$  с учетом  $\sigma_{сж} \approx 2\tau_{сдв}$ , получено:

$$P = 2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{сдв} \approx a \cdot b \cdot \sigma_{сж}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности материала на сжатие, Н/м<sup>2</sup>.

2. Решение об условии разрушения пластины от действия двух сил  $P_z$  и  $P_y$  (определяющих составляющие силы резания, например при точении, рис. 2).

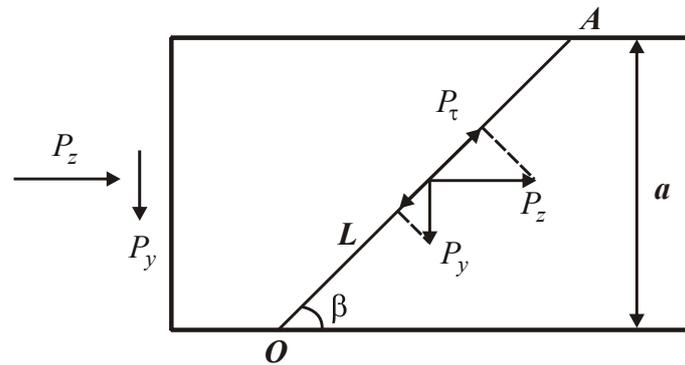


Рис. 2. Расчетная схема

По аналогии с предыдущим решением, касательное напряжение  $\tau$ , возникающее в плоскости OA, расположенной под углом  $\beta$ , определится:

$$\tau = \frac{\sin \beta}{a \cdot b} (P_z \cdot \cos \beta - P_y \cdot \sin \beta) = \frac{P_y \cdot \sin \beta}{a \cdot b} (K_{рез} \cdot \cos \beta - \sin \beta). \quad (3)$$

При точении  $K_{рез} = P_z / P_y = ctg(\psi - \gamma)$ , где  $\psi$  – условный угол трения на передней поверхности инструмента;  $\gamma$  – передний угол инструмента (резца) [4]. Тогда

$$\tau = \frac{P_y}{a \cdot b} \left( \frac{0,5 \cdot \sin 2\beta}{tg(\psi - \gamma)} - \sin^2 \beta \right). \quad (4)$$

Исходя из зависимости (4), имеет место экстремум (максимум) касательного напряжения  $\tau$  от угла  $\beta$  (рис. 4). Для его определения подчиним зависимость (4) необходимому условию экстремума:  $\tau'_\beta = 0$ . Откуда, после преобразований получено  $\cos(\psi - \gamma + 2\beta) = 0$  или  $\beta = 45^\circ + \frac{(\gamma - \psi)}{2}$ . В итоге пришли к известной зависимости Зворыкина К.А. для определения угла сдвига материала при резании.

**Результаты исследований.** Для определения тангенциальной составляющей силы резания  $P_z = \frac{P_y}{tg(\psi - \gamma)}$  подставим в (4) выражение  $\beta = 45^\circ + \frac{(\gamma - \psi)}{2}$  при

$$\tau = \tau_{сдв} :$$

$$P_z = 2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \left[ 45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2} \right]} \quad (5)$$

Очевидно, сила  $P_z$ , определяемая зависимостью (5), будет больше силы  $P$ , определяемой зависимостью (2), т.к.  $\psi > \gamma$  и  $\operatorname{tg} \left[ 45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2} \right] < \operatorname{tg} 45^\circ$ . Следовательно, наличие силы  $P_y$  приводит к увеличению силы  $P_z$  по сравнению со случаем разрушения прямолинейного бруса (пластины) при условии  $P_y = 0$ . Исходя из зависимости (5), уменьшить тангенциальную составляющую силы резания  $P_z$  можно уменьшением угла  $\psi - \gamma$  за счет уменьшения угла  $\psi$  и увеличения угла  $\gamma$ .

3. При взаимодействии резца с обрабатываемым материалом на передней поверхности резца действуют: нормальная сила  $N$  и сила трения  $F$ , образующаяся в результате трения сходящей стружки с передней поверхностью резца (рис. 3).

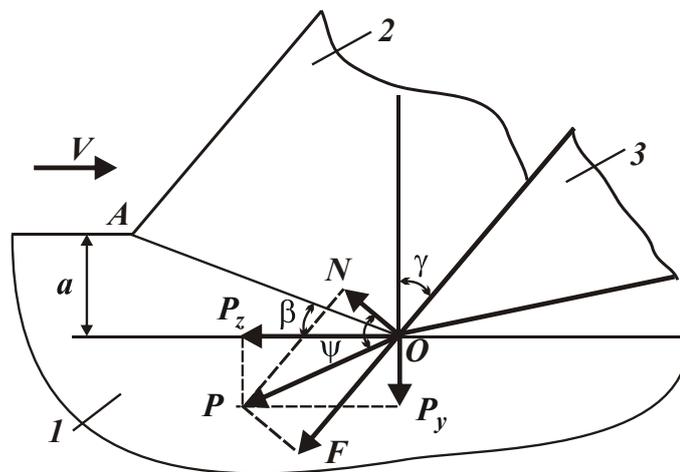


Рис. 3. Расчетная схема составляющих силы резания:

1 – обрабатываемый материал; 2 – стружка; 3 – резец

Суммарная сила резания равна:  $P = \sqrt{N^2 + F^2}$ . С учетом  $\frac{F}{N} = \operatorname{tg} \psi = f$  имеем

$P = N \cdot \sqrt{1 + f^2}$ , где  $f$  – коэффициент трения на передней поверхности инструмента.

Образование стружки происходит вследствие периодических сдвигов элементарных объемов обрабатываемого материала вдоль условной плоскости сдвига ОА [5]. Для определения ее положения необходимо установить угол  $\beta$  из условия до-

стижения наибольшего касательного напряжения:  $\tau = \frac{P_\tau}{\epsilon \cdot L}$ , где  $P_\tau = P \cdot \cos(z + \beta)$  – проекция силы резания  $P$  на условную плоскость сдвига материала  $OA$ ,  $H$ ;  $L = a / \sin \beta$  – длина условной плоскости сдвига материала  $OA$ , м;  $z = \psi - \gamma$ . Тогда

$$\tau = \frac{N \cdot \sqrt{1 + f^2} \cdot \cos(z + \beta) \cdot \sin \beta}{a \cdot \epsilon} = \frac{N \cdot \sqrt{1 + f^2} \cdot [\sin(z + 2\beta) - \sin z]}{2 \cdot a \cdot \epsilon}. \quad (6)$$

Как следует из зависимости (6), касательное напряжение  $\tau$  принимает наибольшее значение при условии  $\sin(z + 2\beta) = 1$  или  $z + 2\beta = 90^\circ$ . Откуда

$$\beta = 45^\circ - \frac{z}{2} = 45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2}. \quad (7)$$

Принимая  $\tau = \tau_{max} = \tau_{сдв}$ , из зависимости (6) можно определить силы  $N$  и  $P$ :

$$N = \frac{2 \cdot a \cdot \epsilon \cdot \tau_{сдв}}{\sqrt{1 + f^2}} \cdot \frac{1}{[\sin(z + 2\beta) - \sin z]} = \frac{2 \cdot a \cdot \epsilon \cdot \tau_{сдв}}{\sqrt{1 + f^2}} \cdot \frac{1}{[1 - \sin(\psi - \gamma)]}; \quad (8)$$

$$P = \frac{2 \cdot a \cdot \epsilon \cdot \tau_{сдв}}{[1 - \sin(\psi - \gamma)]}. \quad (9)$$

Как следует из зависимости (9), сила резания  $P$  тем меньше, чем меньше толщина среза  $a$  и угол  $z = \psi - \gamma$ , т.е. чем меньше угол  $\psi$  и больше  $\gamma$ . Тангенциальная  $P_z$  и радиальная  $P_y$  составляющие силы резания определяются (рис. 3):

$$P_z = P \cdot \cos z = \frac{2 \cdot a \cdot \epsilon \cdot \tau_{сдв} \cdot \cos(\psi - \gamma)}{[1 - \sin(\psi - \gamma)]}; \quad (10)$$

$$P_y = P \cdot \sin z = \frac{2 \cdot a \cdot \epsilon \cdot \tau_{сдв} \cdot \sin(\psi - \gamma)}{[1 - \sin(\psi - \gamma)]}. \quad (11)$$

При шлифовании следует рассматривать угол  $\psi + \gamma$ , тогда

$$P_z = P \cdot \cos z = \frac{2 \cdot a \cdot \epsilon \cdot \tau_{сдв} \cdot \cos(\psi + \gamma)}{[1 - \sin(\psi + \gamma)]}; \quad (12)$$

$$P_y = P \cdot \sin z = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot \sin(\psi + \gamma)}{[1 - \sin(\psi + \gamma)]}. \quad (13)$$

Отношение  $P_z / P_y = \text{ctg}(\psi + \gamma) \rightarrow 0$ . Следовательно, при шлифовании, в отличие от лезвийной обработки, тангенциальная составляющая силы резания меньше радиальной составляющей силы резания.

**Выводы.** В работе рассмотрены различные теоретические подходы к определению силы резания лезвийным инструментом. Исходя из условия максимума касательного напряжения, возникающего в условной плоскости сдвига обрабатываемого материала, определены тангенциальная и радиальная составляющие силы резания. Показано, что в конечном итоге они сводятся к единому решению, из которого вытекают основные условия уменьшения силы резания, состоящие в уменьшении разности условного угла трения на передней поверхности инструмента и переднего угла инструмента. Показано также, что в случае увеличения разности этих углов до значения, равного  $90^\circ$ , сила резания неограниченно увеличивается. Это свидетельствует о высокой силовой напряженности процесса шлифования, характеризующегося значительными отрицательными передними углами режущих зерен. Установлено, что при резании лезвийными инструментами тангенциальная составляющая силы резания больше радиальной составляющей силы резания, а при шлифовании, наоборот, меньше.

**Список литературы:** 1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с. 2. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с. 3. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с. 4. Новіков Ф.В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф.В. Новіков, І.О. Рябенков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с. 5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 10. "Концепции развития технологии машиностроения" – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Bobrov V.F. Osnovy teorii rezaniya metallov / V.F. Bobrov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 343 s. 2. Granovskiy G.I. Rezanie metalov: uchebnyk / G.I. Granovskiy, V.G. Granovskiy. – M.: Vysshaya shkola, 1985. – 304 s. 3. Loladze T.N. Prochnost i iznosostoykost rezhushogo instrumenta / T.N. Loladze. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 320 s. 4. Novikov F.V. Teoretychni osnovy mekhanichnoi obrobky vysokotochnykh detaley: monografiya / F.V. Novikov, I.O. Ryabekov. – Kh. : Vyd. KhNEU, 2013. – 352 s. 5. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya / Pod obsh. red. F.V. Novikova i A.V. Yakimova. V 10 tomakh. – T. 10. "Kontseptsii razvitiya tekhnologii mashinostroeniya" – Odessa: ONPU, 2005. – 565 s.

Надійшла до редколегії 23.10.2014р.

© Кленов О.С., Новиков Ф.В., Крюк А.Г., 2014

ISSN 2079-0023. Вісник НТУ «ХПІ». 2014. №