

## **ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ЭНЕРГОЕМКОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И УСЛОВИЯ ЕЕ УМЕНЬШЕНИЯ**

*Новиков Федор Васильевич, докт. техн. наук, профессор,  
заведующий кафедрой “Техника и технологии”*

*Харьковский национальный экономический университет  
имени Семена Кузнеця*

*Теоретически определена энергоемкость обработки при резании лезвийными и абразивными инструментами. Показано, что при шлифовании энергоемкость обработки всегда больше, чем при точении в связи с отрицательными передними углами режущих абразивных зерен и трением связки круга с обрабатываемым материалом. Полученные теоретические решения могут быть использованы при выборе оптимальных методов механической обработки деталей машин*

Энергоемкость обработки, равная отношению работы резания к объему снятого материала, является важнейшим параметром процесса резания. Вместе с тем, его исследованию в научно-технической литературе уделено мало внимания. Кроме того, известны в основном работы, посвященные экспериментальному исследованию энергоемкости обработки, и фактически отсутствуют работы, раскрывающие физическую сущность этой величины и, тем более, ее аналитическое описание и анализ. В учебниках по резанию материалов [1, 2] и технологии машиностроения [3] также фактически отсутствуют сведения о закономерностях изменения этого важнейшего для механической обработки параметра. Однако, как показывает практика, выбор наиболее эффективных методов обработки конкретных поверхностей деталей (лезвийной или абразивной обработки) производится по критерию наименьшей энергоемкости. Поэтому знание количественных пределов изменения этого параметра для различных методов обработки имеет большое теоретическое и практическое значение, позволяет обосновать условия повышения производительности, качества и других технико-экономических показателей обработки. В особой мере это относится к изготовлению высокоточных деталей авиационного назначения. В связи с этим, в настоящей работе решается актуальная для технологии машиностроения задача теоретического анализа энергоемкости обработки и определения условий ее уменьшения при выборе наиболее эффективных методов механической обработки. Цель работы – аналитическое описание и общий анализ энергоемкости механической обработки.

В общем виде энергоемкость обработки  $\mathcal{E}$  может быть описана зависимостью:

$$\mathcal{E} = \frac{A}{\vartheta} = \frac{N \cdot \tau}{Q \cdot \tau} = \frac{N}{Q}, \quad (1)$$

где  $A = N \cdot \tau$  – работа резания, Дж;  $N$  – мощность резания, Вт;  $\tau$  – время обработки, с;  $\mathcal{G} = Q \cdot \tau$  – объем снятого материала, м<sup>3</sup>;  $Q$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с.

В свою очередь [4]:

$$N = P_z \cdot V = \sigma \cdot F \cdot V, \quad (2)$$

где  $P_z = \sigma \cdot F$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н;  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $F = a \cdot b = S \cdot t$  – площадь поперечного сечения среза (при точении), м<sup>2</sup>;  $a$ ,  $b$  – соответственно толщина и ширина среза, м;  $S$  – подача, м/об;  $t$  – глубина резания, м;  $V$  – скорость резания, м/с.

Производительность обработки  $Q$  выражается зависимостью:

$$Q = S \cdot t \cdot V. \quad (3)$$

С учетом зависимостей (2) и (3) энергоемкость обработки  $\mathcal{E}$  принимает вид

$$\mathcal{E} = \frac{P_z \cdot V}{S \cdot t \cdot V} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t}{S \cdot t} = \sigma. \quad (4)$$

Как видно, энергоемкость обработки  $\mathcal{E}$  численно равна условному напряжению резания  $\sigma$ . Размерность величины  $\mathcal{E}$  с учетом Дж=Н·м принимает вид размерности условного напряжения резания  $\sigma$ , а именно Н/м<sup>2</sup>. Из этого можно заключить, что с физической точки зрения энергоемкость механической обработки  $\mathcal{E}$  обусловлена интенсивностью силовой напряженности процесса резания, определяемой условным напряжением резания  $\sigma$ . Причем, данная закономерность справедлива для процессов как лезвийной, так и абразивной обработки. Так, например, при шлифовании

$$N = P_z \cdot V_{кр}, \quad (5)$$

где  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с.

Если представить снятый при шлифовании за время  $\tau$  материал в виде ленты длиной  $l = V_{кр} \cdot \tau$  и площадью поперечного сечения  $S_{сум}$ , то объем снятого материала выразится

$$\mathcal{G} = S_{сум} \cdot l = S_{сум} \cdot V_{кр} \cdot \tau. \quad (6)$$

По физической сути параметр  $S_{сум}$  определяет суммарную мгновенную площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами шлифовального круга, м<sup>2</sup>. Соответственно производительность обработки  $Q$  определится:

$$Q = S_{сум} \cdot V_{кр}. \quad (7)$$

Подставляя зависимости (5) и (7) в (1), имеем

$$\mathcal{E} = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{S_{сум} \cdot V_{кр}} = \frac{P_z}{S_{сум}} = \sigma. \quad (8)$$

Очевидно, отношение тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  и  $S_{\text{сум}}$  равно условному напряжению резания  $\sigma$ . Следовательно, и при шлифовании энергоёмкость обработки  $\mathcal{E}$  численно равна условному напряжению резания  $\sigma$ . Таким образом, исследование и анализ энергоёмкости обработки  $\mathcal{E}$  к определению условного напряжения резания  $\sigma$ , которое при шлифовании и при микрорезании единичным абразивным зерном будут принципиально отличаться.

Как показано в работе [5], в связи с интенсивным трением связки круга с обрабатываемым материалом значения  $\sigma$  при шлифовании больше, чем при микрорезании единичным абразивным зерном. В зависимости от условий обработки значения  $\sigma$  могут отличаться от 10 до 100 раз. Примерно такое же отличие значений  $\sigma$  имеет место при сравнении процессов шлифования и точения, т.е. при шлифовании условное напряжение резания  $\sigma$  значительно больше, чем при лезвийной обработке.

В работе [6] показано, что в общем случае условное напряжение резания  $\sigma$  описывается аналитической зависимостью:

$$\sigma = \frac{\sigma_{\text{сж}}}{K_{\text{рез}}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{\text{рез}}^2}\right), \quad (9)$$

где  $\sigma_{\text{сж}}$  – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>;  $K_{\text{рез}} = P_z / P_y$ ;  $P_z$ ,  $P_y$  – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н.

Исходя из приведенной зависимости (9), уменьшить  $\sigma$  можно однозначно увеличением коэффициента  $K_{\text{рез}}$ , который при лезвийной обработке определяется  $K_{\text{рез}} = \text{ctg}(\psi - \gamma)$ , а при шлифовании –  $K_{\text{рез}} = \text{ctg}(\psi + \gamma)$ , где  $\psi$  – условный угол трения на передней поверхности резца ( $\text{tg} \psi = f$  – коэффициент трения);  $\gamma$  – передний угол (положительный для резца и отрицательный для абразивного зерна).

Очевидно, коэффициент  $K_{\text{рез}}$  при точении (лезвийной обработке) больше, чем при шлифовании. Следовательно, будет меньше условное напряжение резания  $\sigma$ , описываемое зависимостью (9). Подтверждением тому являются известные экспериментальные данные, согласно которым коэффициент  $K_{\text{рез}}$  при лезвийной обработке всегда больше, чем при шлифовании (микрорезании абразивными зёрнами). Так, установлено, что при шлифовании  $K_{\text{рез}} < 1$ , тогда как при точении  $K_{\text{рез}} \geq 1$  (изменяется в пределах 1...8). Очевидно, при таких больших значениях  $K_{\text{рез}}$ , достигаемых при точении, зависимость (9) может быть упрощена:  $\sigma \approx \sigma_{\text{сж}}$ . В итоге установлено, что условное напряжение резания  $\sigma$  стремится принять значение, равное  $\sigma_{\text{сж}}$ . В этом случае процесс резания по физической сути идентичен процессу разрушения при сжатии прямолинейного образца.

При шлифовании (микрорезании абразивными зернами), когда  $K_{рез} < 1$ , зависимость (9) также может быть упрощена и сведена к виду:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{K_{рез}}. \quad (10)$$

В этом случае условное напряжение резания  $\sigma$  принимает значения, превышающие предел прочности на сжатие обрабатываемого материала  $\sigma_{сж}$ . Причем, при небольших значениях  $K_{рез}$ , например, при  $K_{рез} = 0,1$  (что имеет место на практике), условное напряжение резания  $\sigma$  принимает весьма большие значения, существенно превышающие  $\sigma_{сж}$ . С физической точки зрения это связано с присутствием не только тангенциальной  $P_z$ , но и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания. Для более полного анализа данной закономерности рассмотрим два упрощенных решения.

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

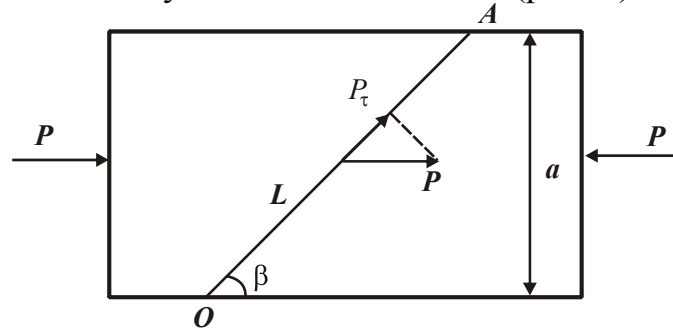


Рис. 1 – Расчетная схема

Касательное напряжение  $\tau$ , возникающее в плоскости  $OA$ , расположенной под углом  $\beta$  к направлению действия сил, равно

$$\tau = \frac{P_\tau}{v \cdot L} = \frac{2P \cdot \sin 2\beta}{a \cdot v}, \quad (11)$$

где  $P_\tau = P \cdot \cos \beta$  – проекция силы  $P$  на плоскость  $OA$ , Н;  $v$  – ширина пластины, м;  $L = a / \sin \beta$  – длина плоскости  $OA$ , м;  $a$  – толщина пластины, м.

Очевидно, наибольшее касательное напряжение  $\tau$  достигается при условии  $\sin 2\beta = 1$  (рис. 2), т.е. при

$$\beta = 45^\circ. \quad (12)$$

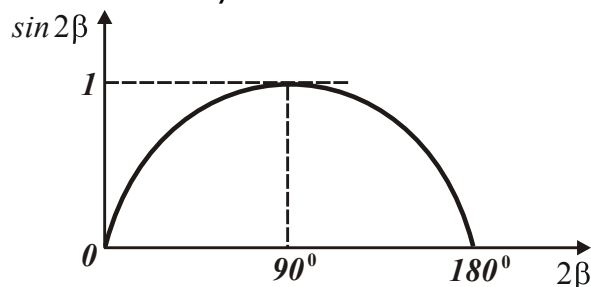


Рис. 2 – График функции  $\sin 2\beta$

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 зависимость (11) значение  $\beta = 45^0$  и принимая  $\tau = \tau_{сдв}$  с учетом  $\sigma_{сж} \approx 2\tau_{сдв}$ , получено:

$$P = 2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{сдв} \approx a \cdot b \cdot \sigma_{сж}. \quad (13)$$

Это известное классическое решение.

2. Решение об условии разрушения пластины от действия двух сил  $P_z$  и  $P_y$  (определяющих составляющие силы резания, например при точении, рис. 3).

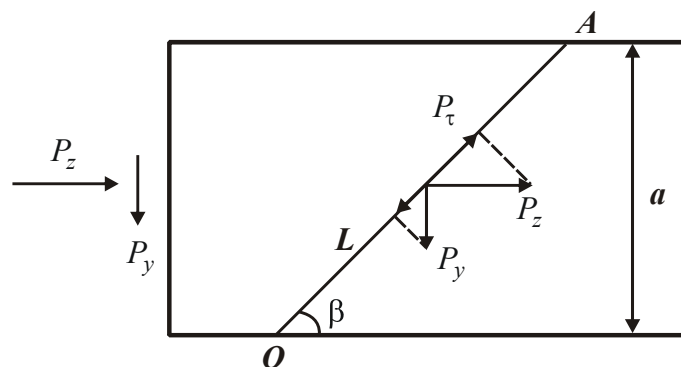


Рис. 3. Расчетная схема

По аналогии с предыдущим решением, касательное напряжение  $\tau$ , возникающее в плоскости ОА, расположенной под углом  $\beta$  к направлению действия силы  $P_z$ , определится:

$$\tau = \frac{\sin \beta}{a \cdot b} (P_z \cdot \cos \beta - P_y \cdot \sin \beta) = \frac{P_y \cdot \sin \beta}{a \cdot b} (K_{рез} \cdot \cos \beta - \sin \beta). \quad (14)$$

При точении  $K_{рез} = ctg(\psi - \gamma)$ . Тогда зависимость (14) примет вид:

$$\tau = \frac{P_y}{a \cdot b} \left( \frac{0,5 \cdot \sin 2\beta}{tg(\psi - \gamma)} - \sin^2 \beta \right). \quad (15)$$

Исходя из зависимости (15), имеет место экстремум (максимум) касательного напряжения  $\tau$  от угла  $\beta$  (рис. 4). Для его определения подчиним зависимость (15) необходимому условию экстремума:  $\tau'_{\beta} = 0$ . Откуда, после преобразований получено  $\cos(\psi - \gamma + 2\beta) = 0$  или

$$\beta = 45^0 + \frac{(\gamma - \psi)}{2}. \quad (16)$$

В итоге пришли к известной зависимости проф. Зворыкина К.А. для определения угла сдвига материала при резании.

При условии  $(\gamma - \psi) = 0$ , т.е. при  $P_y = 0$ , приходим к упрощенной зависимости (12).

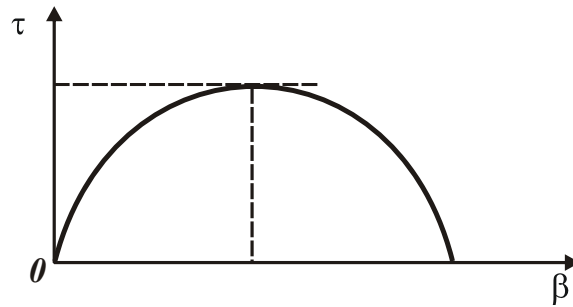


Рис. 4. Зависимость  $\tau$  от  $\beta$

Для определения тангенциальной составляющей силы резания  $P_z = \frac{P_y}{\operatorname{tg}(\psi - \gamma)}$  подставим в (15) выражение (16) при условии  $\tau = \tau_{\text{сдв}}$ . После преобразований получено

$$P_z = 2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}\left[45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2}\right]}. \quad (17)$$

Сила  $P_z$ , определяемая зависимостью (17), будет больше силы  $P_y$ , определяемой зависимостью (13), т.к.  $\psi > \gamma$  и  $\operatorname{tg}\left[45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2}\right] < \operatorname{tg}45^\circ$ .

Таким образом, наличие силы  $P_y$  приводит к увеличению силы  $P_z$  по сравнению со случаем разрушения прямолинейного бруса (пластины) при условии  $P_y = 0$ . Соответственно увеличивается и параметр  $\sigma = P_z / a \cdot v$ . Поэтому на финишных операциях с целью снижения силовой и тепловой напряженностей обработки можно применять как шлифование, так и процессы тонкого, алмазного точения и другие процессы лезвийной обработки. Полученные теоретические решения прошли широкую апробацию и внедрены на ряде машиностроительных предприятий Харькова.

#### 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. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
4. Новиков Ф.В. Теорія високоякісної обробки деталей машин: монографія / Ф.В. Новиков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 384 с.
5. Новиков Г.В. Элементы теории энергоемкости процессов механической обработки / Г.В. Новиков // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Харків: НТУ"ХПІ", 2006. – Вип. 2 (13). – С. 74-86.
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.