

УДК 621.923

**Ф. В. НОВИКОВ, О. С. КЛЕНОВ****УСЛОВИЯ УМЕНЬШЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ И ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Наведено аналітичні залежності для визначення основних параметрів силової напруженості процесу різання: складових сили різання, енергоємності обробки, умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу, що дозволило визначити умови підвищення продуктивності лезової та абразивної обробки. Показано, що чим більше умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу, тим менше складові сили різання, енергоємність обробки та вище продуктивність обробки. Тому при лезовій обробці можна досягти значно більшої продуктивності, ніж при абразивній обробці в зв'язку з меншими значеннями інтенсивності тертя в зоні різання, енергоємності обробки та радіальної складової сили різання.

**Ключові слова:** процес різання, лезова обробка, абразивна обробка, складові сили різання, енергоємність обробки, продуктивність обробки.

Приведены аналитические зависимости для определения основных параметров силовой напряженности процесса резания: составляющих силы резания, энергоёмкости обработки, условного угла сдвига обрабатываемого материала, что позволило определить условия повышения производительности лезвийной и абразивной обработки. Показано, что чем больше условный угол сдвига обрабатываемого материала, тем меньше составляющие силы резания, энергоёмкость обработки и выше производительность обработки. Поэтому при лезвийной обработке можно достичь значительно большей производительности, чем при абразивной обработке в связи с меньшими значениями интенсивности трения в зоне резания, энергоёмкости обработки и радиальной составляющей силы резания.

**Ключевые слова:** процесс резания, лезвийная обработка, абразивная обработка, составляющие силы резания, энергоёмкость обработки, производительность обработки

Analytical dependences are given to determine the main parameters of the strength of the cutting process: the components of the cutting force, the energy intensity of the treatment, the conventional shear angle of the processed material, which made it possible to determine the conditions for improving the productivity of blade and abrasive processing. It is shown that the greater the relative shear angle of the processed material, the smaller the components of the cutting force, the energy intensity of the treatment, and the higher the processing capacity. Therefore, with blade cutting, a much higher productivity can be achieved than with abrasive treatment due to the lower values of the friction intensity in the cutting zone, the energy intensity of the treatment, and the radial component of the cutting force.

**Key words:** cutting process, blade processing, abrasive machining, cutting force components, power consumption of processing, processing capacity

**Постановка проблеми.** В настоящее время на практике широко используются методы лезвийной и абразивной обработки. При этом все чаще на операциях предварительной обработки применяются методы шлифования, вытесняя традиционные методы лезвийной обработки, а на операциях окончательной обработки, наоборот, вместо абразивной обработки применяют лезвийную обработку, обеспечивая более высокие показатели качества и точности обрабатываемых поверхностей деталей. Такой выбор методов обработки обусловлен их технологическими возможностями, определяемыми главным образом энергоёмкостью и производительностью обработки. Поэтому их знание открывает новые перспективы развития технологии машиностроения, связанные с применением современных металлорежущих станков с ЧПУ типа «обрабатывающий центр» и прогрессивных конструкций инструментов с износостойкими покрытиями. В связи с этим в работе предложен новый теоретический подход к определению и анализу условий уменьшения силовой напряженности процессов резания лезвийными и абразивными инструментами и повышения производительности обработки.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работах [1– 3, 7] приведены методики определения параметров силовой напряженности процесса резания, основанные на результатах экспериментальных исследований, которые справедливы для частных условий обработки и не позволяют в обобщенном виде произвести расчет таких параметров силовой напряженности процесса резания, как составляющие силы резания, энергоёмкость обработки, коэффициент усадки стружки и др. Это затрудняет анализ техноло-

гических закономерностей процесса резания и условий повышения его эффективности. Особо это относится к высокоточной обработке ответственных деталей, изготовленных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами. Поэтому установление указанных аналитических зависимостей имеет большое теоретическое и практическое значение при решении задач повышения точности, качества и производительности механической обработки.

**Цель работы** – теоретическое определение и анализ условий уменьшения энергоёмкости и повышения производительности механической обработки и на их основе обоснование наиболее эффективных направлений применения методов лезвийной и абразивной обработки.

**Основной материал.** В работе разработана тематическая модель механики процесса резания, позволяющая с единых позиций оценить технологические возможности повышения производительности и качества обработки. На основе аналитического определения и анализа параметров силовой напряженности процесса резания обоснованы условия повышения его эффективности.

Предположим, что на обрабатываемый материал со стороны движущегося инструмента действует система двух сил, состоящая из тангенциальной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания (рис. 1,а).

Под действием этих сил обрабатываемый материал деформируется. В нем возникают касательные напряжения  $\tau$  в плоскостях, расположенных под углом  $\beta$  к направлению движения инструмента. Для определе-

© Ф.В. Новиков, О.С. Кленов, 2017

ния положения плоскости, в которой касательное напряжение  $\tau$  максимально и в которой произойдет сдвиг материала, необходимо спроецировать составляющие силы резания  $P_z$  и  $P_y$  на плоскость, расположенную под углом  $\beta$ , и определить касательное напряжение:

$$\tau = \frac{\sin \beta}{a \cdot \delta} \cdot (P_z \cdot \cos \beta - P_y \cdot \sin \beta), \quad (1)$$

где  $a, \delta$  – толщина и ширина среза, м.

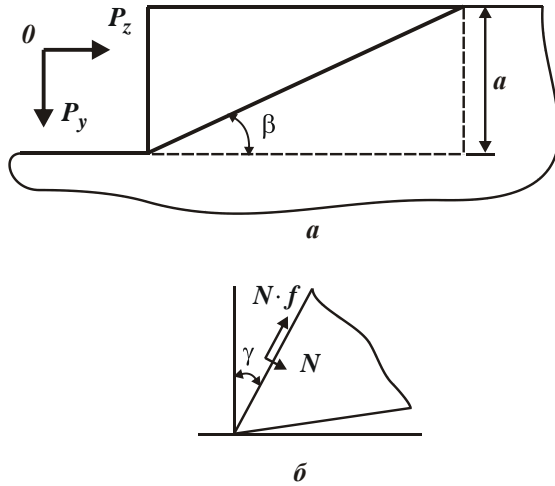


Рис. 1 – Расчетная схема параметров стружкообразования: а – при резании; б – схема сил, действующих на передней поверхности инструмента

С учетом  $K_{рез} = P_z / P_y$  получено:

$$\tau = \frac{P_y}{a \cdot \delta} \cdot (0,5 \cdot K_{рез} \cdot \sin 2\beta - \sin^2 \beta). \quad (2)$$

Касательное напряжение  $\tau$  имеет максимум от угла  $\beta$ . Поэтому, подчиняя функцию  $\tau$  условию экстремума  $\tau' = 0$ , получена зависимость для определения экстремального значения угла  $\beta$  – условного угла сдвига обрабатываемого материала:

$$\operatorname{tg} 2\beta = K_{рез}. \quad (3)$$

С увеличением угла  $\beta$  коэффициент резания  $K_{рез}$  неограниченно увеличивается. При условии  $\beta \rightarrow 45^\circ$  имеем  $K_{рез} \rightarrow \infty$ , что соответствует условию одноосного сжатия снимаемого припуска (в виде прямолинейного бруса) продольной силой  $P_z$ .

С учетом соотношения  $\operatorname{tg} 2\beta = \frac{\sin 2\beta}{\sqrt{1 - \sin^2 2\beta}}$  и (3)

зависимость (2) можно преобразовать:

$$K_{рез}^2 \cdot (1 - \sin^2 2\beta) = \sin^2 2\beta, \quad (4)$$

откуда

$$\sin 2\beta = \frac{K_{рез}}{\sqrt{1 + K_{рез}^2}}; \quad (5)$$

$$\sin^2 \beta = \frac{(1 - \sqrt{1 - \sin^2 2\beta})}{2} = \frac{(1 - \sqrt{1 - \frac{K_{рез}^2}{1 + K_{рез}^2}})}{2}. \quad (6)$$

Подставляя зависимости (5) и (6) в (2), после преобразования получено:

$$\tau = \frac{P_y}{2 \cdot a \cdot \delta} \cdot (\sqrt{1 + K_{рез}^2} - 1). \quad (7)$$

Умножая числитель и знаменатель зависимости (7) на сопряженную величину  $(\sqrt{1 + K_{рез}^2} + 1)$ , имеем:

$$\tau = \frac{P_y}{2 \cdot a \cdot \delta} \cdot \frac{K_{рез}^2}{(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2})}. \quad (8)$$

Принимая условие  $\tau = \tau_{сдв}$  из зависимости (8) определяется радиальная составляющая силы резания:

$$P_z = \frac{2 \cdot a \cdot \delta \cdot \tau_{сдв}}{K_{рез}^2} \cdot (1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}), \quad (9)$$

где  $\tau_{сдв}$  – предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг, Н/м<sup>2</sup>.

Соответственно тангенциальная составляющая силы резания  $P_y$  и условное напряжение резания  $\sigma$  (энергоёмкость обработки) аналитически опишутся:

$$P_z = K_{рез} \cdot P_y = \frac{2 \cdot a \cdot \delta \cdot \tau_{сдв}}{K_{рез}} \cdot (1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}); \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{P_z}{a \cdot \delta} = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{K_{рез}} \cdot (1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}), \quad (11)$$

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

Коэффициент резания  $K_{рез}$  может изменяться в широких пределах:  $0 < K_{рез} < \infty$ . При резании абразивным инструментом  $K_{рез} < 1$ , при резании лезвийным инструментом  $K_{рез} \geq 1$ . С увеличением  $K_{рез}$ , исходя из зависимости (11), условное напряжение резания  $\sigma$  (энергоёмкость обработки) уменьшается.

Для условия  $K_{рез} < 1$  имеем:

$$\sigma = \frac{\tau_{сдв}}{K_{рез} \cdot \left[ \frac{1}{2 \cdot \sqrt{1 + K_{рез}^2}} - \frac{1}{(4 + K_{рез}^2)} \right]}. \quad (12)$$

Как видно, уменьшить условное напряжение резания  $\sigma$  можно увеличением коэффициента резания  $K_{рез}$ . Таким образом показано, что условное напряжение резания  $\sigma$  (энергоёмкость обработки) зависит от коэффициента резания  $K_{рез}$  и предела прочности обрабатываемого материала на сдвиг  $\tau_{сдв}$ .

С учетом тригонометрического соотношения  $tg2\beta = \frac{2 \cdot tg\beta}{1 - tg^2\beta}$  и зависимости (3) условное напряжение резания  $\sigma$  (энергоёмкость обработки), описываемое зависимостью (11), принимает упрощенный вид:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{tg\beta}. \quad (13)$$

Как видно, энергоёмкость обработки  $\sigma$  вполне однозначно определяется условным углом сдвига обрабатываемого материала  $\beta$ : чем он больше, тем меньше  $\sigma$ , что согласуется с известными экспериментальными данными.

Коэффициент резания  $K_{рез}$  можно выразить через силы  $N$  и  $N \cdot f$ , возникающие на передней поверхности инструмента (рис. 1, б, рис. 2):

$$\begin{cases} P_z = N \cdot \cos \gamma + N \cdot f \cdot \sin \gamma \\ P_y = N \cdot \sin \gamma + N \cdot f \cdot \cos \gamma \end{cases}, \quad (14)$$

где  $f$  – коэффициент трения;  
 $\gamma$  – передний угол инструмента.

Откуда

$$K_{рез} = \frac{1 + f \cdot tg\gamma}{f - tg\gamma}. \quad (15)$$

С увеличением переднего угла инструмента  $\gamma$  и уменьшением коэффициента трения  $f$  (учитывая доминирующую роль знаменателя в зависимости (15)) коэффициент резания  $K_{рез}$  увеличивается, что приводит к уменьшению  $\sigma$ . Этим показано, что наиболее энергоёмкими являются процессы абразивной обработки, характеризующиеся небольшими значениями  $K_{рез} < 1$  вследствие отрицательных передних углов режущих зерен. Процессы лезвийной обработки менее энергоёмки.

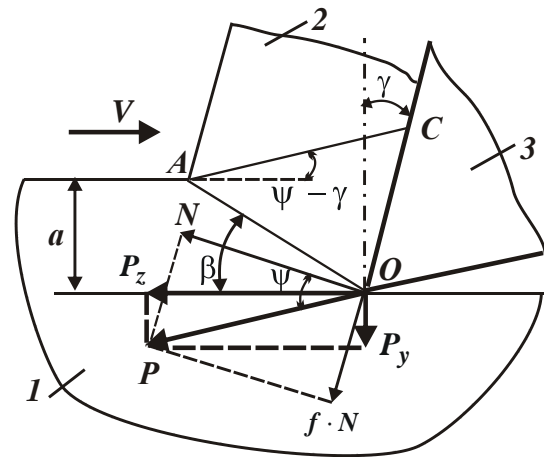


Рис. 2 – Расчетная схема параметров стружкообразования при резании: 1 – обрабатываемый материал; 2 – образующая стружка; 3 – режущий инструмент

Наименьшей энергоёмкостью обладают процессы обработки металлов давлением. Теоретические результаты согласуются с экспериментальными данными. Например, по данным Швеца В. В. (табл. 1 [4]), энергия, затрачиваемая на сьем материала, меньше, а производительность обработки больше при резании лезвийным инструментом. По мере уменьшения отношения  $a_z/R$  (где  $a_z$  – толщина среза, м;  $R$  – радиус округления режущей кромки инструмента, м), т.е. с переходом от точения к развертыванию и шлифованию, энергия, затрачиваемая на сьем материала, увеличивается, что связано с ухудшением условий стружкообразования в процессе резания.

Операции обработки металлов давлением [4] характеризуются наименьшей энергоёмкостью, что также согласуется с приведенными теоретическими результатами. С учетом  $tg\psi = f$  зависимость (15) принимает вид:

$$K_{рез} = ctg(\psi - \gamma), \quad (16)$$

где  $\psi$  – условный угол трения на передней поверхности инструмента.

Сравнивая зависимости (3) и (16), получено:

$$\beta = 45^\circ + \frac{\gamma - \psi}{2}. \quad (17)$$

Эта зависимость совпадает с известной зависимостью для расчета условного угла сдвига материала, полученной профессором Зворыкиным К. А.

Таблица 1 – Характеристика типовых операций механической обработки

Операции	Площадь поперечного сечения срезаемого слоя, мм <sup>2</sup>	Энергия, затрачиваемая на сьем металла, 10 <sup>-3</sup> Дж/см <sup>3</sup>	Скорость резания, м/с	Производительность обработки, см <sup>3</sup> /с
Точение	1,0	0,5 – 0,7	1,5 – 7,5	5·10 <sup>-2</sup> – 5·10
Протягивание	0,5	2,5 – 3,7	0,01 – 0,1	4·10 <sup>-3</sup> – 1·10 <sup>-1</sup>
Фрезерование	0,3	5,0 – 7,5	2 – 6	2·10 <sup>-3</sup> – 1
Развертывание	0,1	12 – 30	0,15 – 1,6	5·10 <sup>-3</sup> – 5·10 <sup>-1</sup>
Шлифование	0,00005	55 – 70	25 – 50	5·10 <sup>-3</sup> – 2·10 <sup>-2</sup>

Согласно зависимости (16), добиться выполнения условия  $K_{рез} \rightarrow \infty$  и, следовательно, наименьшего значения  $\sigma \rightarrow 2 \cdot \tau_{сдв}$  можно при условии  $\gamma \rightarrow \psi$ .

Исходя из зависимостей  $P_z = \sigma \cdot Q/V$  и (11), можно определить производительность обработки:

$$Q = \frac{P_z \cdot V}{2 \cdot \tau_{сдв}} \cdot \frac{K_{рез}}{\left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right)}. \quad (18)$$

Как видно, для увеличения производительность обработки  $Q$  необходимо увеличивать параметры  $P_z$ ,  $V$  и  $K_{рез}$ . Однако увеличение тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  ограничено прочностью инструмента, а увеличение скорости резания  $V$  – его стойкостью в связи с увеличением температуры резания. Коэффициент резания  $K_{рез}$  практически неограничен и изменяется в широких пределах  $0 < K_{рез} < \infty$ . При этом производительность обработки  $Q$  с увеличением коэффициента резания  $K_{рез} \rightarrow \infty$  непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к максимальному значению

$$Q_{max} = \frac{P_z \cdot V}{2 \cdot \tau_{сдв}} = \frac{N}{2 \cdot \tau_{сдв}} = \frac{N}{\sigma_{сж}}, \quad (19)$$

где  $N = P_z \cdot V$  – мощность резания, Вт.

Следовательно, чем больше коэффициент резания  $K_{рез}$ , тем больше производительность обработки  $Q$ . Исходя из зависимости (15), это связано с выполнением условия  $f \rightarrow tg\gamma$ . На рис. 3 приведены расчетные значения отношения

$$\frac{Q}{Q_{max}} = \frac{K_{рез}}{\left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right)}, \quad (20)$$

которые вполне однозначно определяются коэффициентом резания  $K_{рез}$ . Согласно зависимости (19), максимальная производительности обработки  $Q_{max}$  определяется мощностью резания  $N$ : чем больше  $N$ , тем больше  $Q_{max}$  (рис. 4).

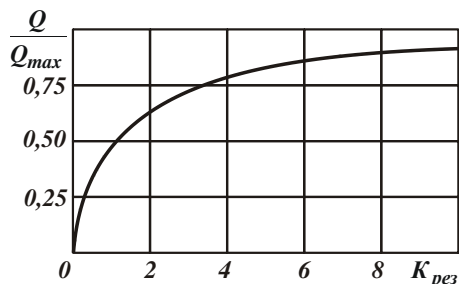


Рис. 3 – Зависимость отношения  $Q/Q_{max}$  от

коэффициента резания  $K_{рез}$

Таким образом, добиться существенного увеличения производительности обработки  $Q$  можно в условиях резания лезвийными инструментами ( $K_{рез} > 1$ ), управляя контактными процессами на рабочих поверхностях инструмента. При резании абразивными инструментами (при шлифовании) справедливо условие  $K_{рез} < 1$ , что ограничивает увеличение производительности обработки  $Q$ , которая в данном случае равна:

$$Q = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{4 \cdot \tau_{сдв}} \cdot K_{рез}, \quad (21)$$

где  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с.

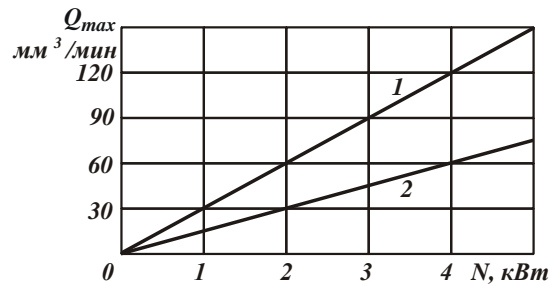


Рис. 4– Зависимость максимальной производительности обработки  $Q_{max}$

от мощности резания  $N$ : 1 –  $\sigma_{сж} = 2000$  Н/мм²;

2 –  $\sigma_{сж} = 4000$  Н/мм²

Увеличить производительность обработки  $Q$  можно увеличением параметров  $P_z$ ,  $V_{кр}$  и  $K_{рез}$ . Зависимость (21) справедлива при шлифовании по жесткой схеме. При шлифовании по упругой схеме с учетом  $P_z = P_y \cdot K_{рез}$ , имеем:

$$Q = \frac{P_y \cdot V_{кр}}{4 \cdot \tau_{сдв}} \cdot K_{рез}^2. \quad (22)$$

Здесь роль коэффициента резания  $K_{рез}$  усиливается, и производительность обработки  $Q$  зависит главным образом от  $K_{рез}$ .

Удельные составляющие силы резания описываются зависимостями:

$$P_{zуд} = \frac{P_z}{a \cdot v \cdot \sigma_{сж}} = \frac{1}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right); \quad (23)$$

$$P_{yуд} = \frac{P_y}{a \cdot v \cdot \sigma_{сж}} = \frac{1}{K_{рез}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right). \quad (24)$$

Из зависимостей (23) и (24) следует, что параметры  $P_{zуд}$  и  $\sigma$  идентичны, т.к. описываются одной и той же зависимостью. Анализ рассчитанных на ос-

нове зависимости (23) и (24) значений  $P_{z_{y\delta}}$  и  $P_{y_{y\delta}}$ , которые приведены на рис. 5,а, показывает, что при условии  $K_{рез} = 1$  параметры  $P_{z_{y\delta}}$  и  $P_{y_{y\delta}}$  равны между собой, а при условии  $K_{рез} < 1$  и  $K_{рез} > 1$  справедливы условия  $P_{z_{y\delta}} < P_{y_{y\delta}}$  и  $P_{z_{y\delta}} > P_{y_{y\delta}}$ .

Как известно, условие  $K_{рез} < 1$  реализуется при абразивной обработке, а условие  $K_{рез} > 1$  – при лезвийной обработке [5]. Следовательно, при абразивной обработке наибольшее влияние на технологические параметры процесса оказывает радиальная  $P_y$  составляющая силы резания, а при лезвийной обработке – тангенциальная  $P_z$  составляющая силы резания. При этом составляющие силы резания при лезвийной обработке ( $K_{рез} > 1$ ) меньше, чем при абразивной обработке ( $K_{рез} < 1$ ), что свидетельствует о возможностях повышения точности и качества обработки при резании лезвийными инструментами. Это обусловлено меньшими значениями энергоёмкости обработки  $\sigma = P_{z_{y\delta}}$ , которая при условии  $K_{рез} \rightarrow \infty$  стремится принять значения  $\sigma_{сж}$ . В этом случае условия стружкообразования соответствуют условиям разрушения прямолинейного образца при его сжатии. С учетом формулы профессора Тиме А. Н.:

$\operatorname{tg}\beta = \frac{\cos\gamma}{K_L - \sin\gamma}$  зависимость (22) выразится:

$$\sigma = \sigma_{сж} \cdot \frac{(K_L - \sin\gamma)}{\cos\gamma}, \quad (25)$$

где  $K_L$  – коэффициент усадки стружки.

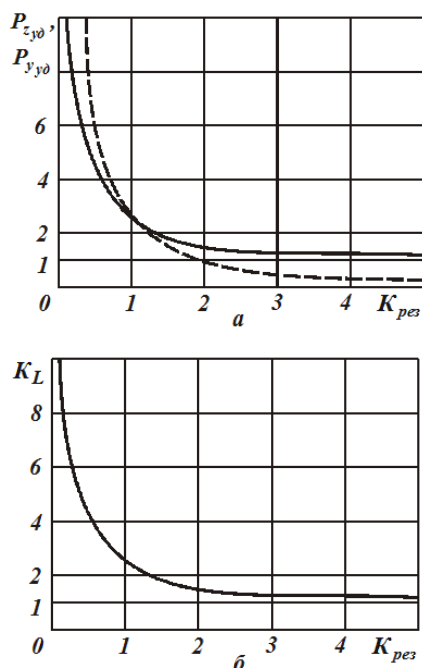


Рис. 5– Зависимости  $P_{z_{y\delta}}$  (сплошная линия) и  $P_{y_{y\delta}}$  (пунктирная линия) от: а -  $K_{рез}$  и  $K_L$ ; б -  $K_{рез}$

Поскольку  $K_L \gg \sin\gamma$ , а  $\cos\gamma \approx 1$ , то зависимость (25) в первом приближении может быть упрощена и представлена в виде:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{сж}} = K_L. \quad (26)$$

Таким образом показано, что энергоёмкость обработки  $\sigma$  определяет коэффициент усадки стружки  $K_L$ : чем больше  $\sigma$ , тем больше  $K_L$ .

Подставляя зависимость (22) в (26), имеем:

$$K_L = \frac{1}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right). \quad (27)$$

Откуда

$$K_{рез} = \frac{2 \cdot K_L}{(K_L^2 - 1)}. \quad (28)$$

На рис. 5,б приведены рассчитанные по зависимости (27) значения  $K_L$ . Как видно, коэффициент усадки стружки  $K_L$  резко уменьшается в диапазоне  $K_{рез} < 1$  и незначительно изменяется в диапазоне  $K_{рез} > 1$ , неограниченно приближаясь к значению  $K_L \rightarrow 1$ . Следовательно, основные изменения  $K_L$  происходят в диапазоне  $K_{рез} < 1$ .

Исходя из приведенной зависимости  $K_{рез} = P_z / P_y = \operatorname{tg}2\beta = \operatorname{ctg}(\psi - \gamma)$ , уменьшение коэффициента резания  $K_{рез}$  связано с уменьшением условного угла сдвига обрабатываемого материала  $\beta$  за счет увеличения разности углов  $(\psi - \gamma)$ , т.е. увеличения условного угла трения на передней поверхности инструмента  $\psi$  и уменьшения переднего угла инструмента  $\gamma$ . В особой мере это проявляется при шлифовании, когда угол  $\gamma$  становится отрицательным и зависимость для определения коэффициента резания принимает вид  $K_{рез} = P_z / P_y = \operatorname{tg}2\beta = \operatorname{ctg}(\psi + \gamma)$ . В этом случае с увеличением угла  $(\psi + \gamma)$  коэффициент резания  $K_{рез} \rightarrow 0$ . этим объясняется более высокие значения составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_y$ , энергоёмкости обработки  $\sigma$  и соответственно коэффициента усадки стружки  $K_L$ , которые имеют место на практике при шлифовании. Исходя из сказанного, основными путями увеличения коэффициента резания  $K_{рез}$  и соответственно уменьшения параметров силовой напряженности процесса резания  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $\sigma$  и  $K_L$  являются уменьшение угла  $\psi$  и увеличение положительного угла  $\gamma$  (при лезвийной обработке) и уменьшение отрицательного угла  $\gamma$  (при абразивной обработке). При резании алмазным лезвийным инструментом, характеризующимся наименьшим коэффициентом трения на передней поверхности инструмента, раз-

ность углов ( $\psi - \gamma$ ) может быть существенно уменьшена, что приводит к увеличению коэффициента резания  $K_{рез}$  и снижению параметров силовой напряженности процесса резания  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $\sigma$  и  $K_L$ .

Заслуживает внимания факт, что значениям  $K_L > 2$  соответствуют значения  $K_{рез} < 1$ . В этом случае  $P_z < P_y$ , что согласуется с результатами экспериментальных исследований при шлифовании. Однако при точении наблюдается противоположная закономерность:  $P_z > P_y$  при  $K_L > 2$  [1]. Данное несоответствие теоретических и экспериментальных результатов связано с тем, что тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$ , описываемая зависимостью (18), определяет лишь условие сдвига обрабатываемого материала в условной плоскости сдвига и не учитывает трение сходящей стружки с передней поверхностью инструмента, тогда как экспериментально установленная тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$  является результирующей, учитывающей как условия сдвига обрабатываемого материала в условной плоскости сдвига, так и процесс трения на передней поверхности инструмента.

В отличие от тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$ , радиальная составляющая силы резания  $P_y$ , описываемая зависимостью (21), приблизительно равна ее экспериментальному значению. Поэтому между составляющими силы резания  $P_z$  и  $P_y$ , описываемыми зависимостями (18) и (21), существует сложная связь  $P_z / P_y = K_{рез}$ , где коэффициент резания  $K_{рез}$  может принимать значения  $K_{рез} < 1$  и  $K_{рез} > 1$ . Экспериментально установлено, что  $P_z / P_y = 1/f$ , где  $f$  – коэффициент трения сходящей стружки с передней поверхностью резца ( $f < 1$ ). Следовательно, при точении  $P_z > P_y$ , что соответствует условию  $K_{рез} > 1$ . Этим показано, что процесс резания подчиняется более сложным закономерностям и не может быть однозначно представлен экспериментально установленными составляющими силы резания, которые учитывают процессы резания и трения при стружкообразовании.

На основе проведенного анализа можно заключить, что основным условием повышения коэффициента резания  $K_{рез} > 1$  и в целом эффективности обработки является уменьшение радиальной составляющей силы резания  $P_y$ , которая обусловлена интенсивным трением сходящей стружки с передней поверхностью резца [6]. Это может быть достигнуто различными способами дробления стружки в зоне резания, снижением коэффициента трения обрабатываемого и инструментального материалов, применением так называемого косоугольного резания, обеспечивающего изменение угла схода стружки и т.д. необходимо отметить, что в настоящее время на практике имеется большой арсенал технических решений

по уменьшению радиальной составляющей силы резания  $P_y$ . Однако, все они основаны на эмпирическом представлении процесса резания, что не позволяет в полной мере раскрыть физические закономерности и технологические возможности процесса резания. Поэтому предложенная в работе математическая модель механики процесса резания позволит в определенной степени ликвидировать имеющийся дисбаланс между теорией и практикой процесса резания и выявить новые технологические возможности повышения его эффективности.

**Выводы.** В работе получены аналитические зависимости для определения основных параметров силовой напряженности процесса резания: составляющих силы резания, энергоемкости обработки, условного угла сдвига обрабатываемого материала, что позволило определить условия повышения производительности лезвийной и абразивной обработки. Показано, что чем больше условный угол сдвига обрабатываемого материала, тем меньше составляющие силы резания, энергоемкость обработки и соответственно выше производительность обработки. Поэтому при лезвийной обработке можно достичь значительно большей производительности, чем при абразивной обработке в связи с меньшей энергоемкостью обработки. Теоретически установлено, что основным путем снижения силовой напряженности процесса резания и повышения производительности обработки является улучшение условий стружкообразования в процессе резания за счет уменьшения радиальной составляющей силы резания, используя различные способы дробления образующейся стружки, снижая интенсивность трения обрабатываемого и инструментального материалов, изменяя угол схода стружки с передней поверхности резца и т.д.

#### Список литературы

1. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
2. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н.Н. Зорев. – М.: Mashgiz, 1956. – 368 с.
3. Линчевский П. А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках / П. А. Линчевский, Т. Г. Джугурян, А. А. Оргиян. – К.: Техника, 2001. – 300 с.
4. Швец В. В. Некоторые вопросы теории технологии машиностроения / В. В. Швец. – М.: Машиностроение, 1967. – 63 с.
5. 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.
6. Новиков Ф. В. Теоретическое обоснование условий повышения эффективности высокоскоростной обработки / Ф. В. Новиков, О. С. Кленов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП». – 2014. – №42 (1085). – С. 106–111.
7. Добротворский С. С. Энергетический подход к определению технологических режимов при высокоскоростной обработке / С. С. Добротворский, А. К. Мялица, Е. В. Басова [и др.] // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Харьков: НАУ "ХАИ", 2014. – № 65. – С. 69-74.

#### References (transliterated)

1. Bobrov V. F. Osnovy teorii rezaniya metallov. Moscow. 1975. 344 p.
2. Zorev N.N. Voprosy mekhaniki protsessya rezaniya metallov. Moscow. Mashgiz. 1956. 368 p. Print.
3. Linchevskiy P. A., Dzhuguryan, T. G., Orgiyana A. A. Obrabotka detaley na otdelochno-rastochnykh stan-kakh. Kie. Tekhnika. 2001. 300 p. Print.
4. Shvets V. V. Nekotoryye voprosy teorii tekhnologii mashinostroyeniya. Moscow. Mashinostroyeniye. 1967. 63 p. Print.

5. A. V. Yakimov, F. V. Novikov, G. V. Novikov, B. S. Serov, A.A. Yakimov. Teoreticheskiye osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov: ucheb. Posobiye. Odessa. OGPU 1999. 450 p. Print.
6. Novikov F.V., Klenov O.S. Teoreticheskoe obosnovanie usloviy povysheniya effektivnosti vysokoskorostnoy obrabotki. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Tekhnologii v mashinobuduvanni. – Kharkiv: NTU "KhPI". 2014. – №42 (1085). – pp. 106–111.
7. Dobrotvorskyyi S. S., Mialytsa A.K., Basova E.V. Energeticheskij podxod k opredeleniyu texnologicheskix rezhimov pri vysokoskorostnoy obrabotke [Energy approach to the definition of technological regimes in HSM]. *Kharkov, Nats. aero-kosm. un-t «Khark. aviats. in-t»*, 2014, No 65, pp. 69-74.

Поступила (received) 20.03.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Умови зменшення енергоємності та підвищення продуктивності механічної обробки / Ф. В. Новіков, О. С. Кленов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 38–44. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

**Условия уменьшения энергоёмкости и повышения производительности механической обработки / Ф. В. Новиков, О.С. Кленов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 38–44. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

**Conditions for reducing energy intensity and increasing the productivity of machining / F. Novikov, O. Klenov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P.38–44. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-004X.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Новіков Федір Васильович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru;

**Новиков Федор Васильевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Естественные науки и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru;

**Novikov Fedor Vasiliviyth** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department of "Science and Technology" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets, Kharkiv; tel.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru;

**Кленов Олег Станіславович** – кандидат технічних наук, директор, Фірма «ДіМерус Інженерінг» ТОВ, м. Харків; тел.: +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com;

**Кленов Олег Станіславович** – кандидат технических наук, директор, Фирма «ДиМерус Инженеринг» ООО, г. Харьков; тел.: +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com;

**Klenov Oleg Stanislavovith** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), director of the firm "DiMerus Engineering" Ltd, Kharkiv; tel. : +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com.