

Ф.В. Новиков, д-р техн. наук, Харьков, Украина

ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ДОЛЕЙ ЭНЕРГИЙ РЕЗАНИЯ И ТРЕНИЯ В ОБЩЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ БАЛАНСЕ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В роботі запропоновано нову математичну модель визначення параметрів силової напруженості процесу різання при точінні та розроблено методику визначення коефіцієнта тертя інструментального та оброблюваного матеріалів на передній та задній поверхнях різця на основі оцінювання та аналізу часток енергій різання й тертя в загальному енергетичному балансі процесу механічної обробки з урахуванням зносу різця по задній поверхні. Проведено експериментальну перевірку отриманих теоретичних рішень.

Ключові слова: механічна обробка, процес різання, точіння, сила різання, знос різця, тертя, математична модель

В работе предложена новая математическая модель определения параметров силовой напряженности процесса резания при точении и разработана методика определения коэффициента трения инструментального и обрабатываемого материалов на передней и задней поверхностях резца на основе оценки и анализа долей энергии резания и трения в общем энергетическом балансе процесса механической обработки с учетом износа резца по задней поверхности. Произведена экспериментальная проверка полученных теоретических решений.

Ключевые слова: механическая обработка, процесс резания, точение, сила резания, износ резца, трение, математическая модель

The paper proposes a new mathematical model for determining the parameters of the strength of the cutting process during turning and a method has been developed for determining the coefficient of friction of tool and processed materials on the front and back surfaces of the tool based on estimating and analyzing the fractions of cutting and friction energies in the total energy balance of the machining process, cutter on the back surface. The experimental verification of the theoretical solutions obtained is made.

Keywords: machining, cutting process, turning, cutting force, tool wear, friction, mathematical model

1. Постановка проблеми. Процеси різання матеріалів характеризуються найменшою енергоємністю і найбільшою продуктивністю обробки серед інших процесів і тому в найближчі роки не втраять своєї значимості в металлообробці. Разом з тим, вони потребують подальшого розвитку, оскільки з появою нових важкооброблюваних матеріалів і підвищенням вимог до їх обробки постійно виникають проблеми технологічного забезпечення якості, точності і продуктивності обробки. Особливо це стосується сучасних технологій механічної обробки на станках з ЧПУ типу «оброблюючий центр» з використанням збірних твердосплавних і керамічних режущих інструментів з зносостійкими покриттями,

которые не позволяют в полной мере реализовать свои высокие потенциальные возможности в связи с отсутствием достаточных сведений и знаний о критериях выбора рациональных режимов резания, характеристик инструментов и т.д. Важным нерешенным вопросом является раздельный учет и оценка долей энергий резания и трения в общем энергетическом балансе процесса механической обработки, так как от него во многом зависит правильный выбор рациональных условий обработки. Исходя из этого, в работе предложена новая математическая модель определения параметров силовой напряженности процесса резания при точении, позволяющая определить коэффициент трения инструментального и обрабатываемого материалов при точении с учетом износа резца по задней поверхности.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Разработке теории резания материалов посвящены многочисленные работы [1–3]. Однако в них отсутствует теоретическое решение, позволяющее раздельно оценить доли энергий резания и трения на передней и задней поверхностях резца при точении в общем энергетическом балансе процесса механической обработки. Это связано с тем, что сложно раздельно учесть и оценить силы резания, действующие на передней и задней поверхностях резца. Поэтому в работе поставлена задача разработки новой математической модели этого раздельного учета сил резания при точении и правильного определения коэффициента трения инструментального и обрабатываемого материалов с учетом износа резца по задней поверхности.

3. Цель исследования. Теоретический анализ параметров силовой напряженности процесса резания при точении и разработка методики определения коэффициента трения инструментального и обрабатываемого материалов на основе раздельного учета сил резания на передней и задней поверхности.

4. Разработка математической модели параметров силовой напряженности процесса резания при точении. Для решения поставленных в работе задач следует провести анализ возникающих в процессе точения составляющих силы резания и их отношения (рис. 1):

$$\frac{P_z}{P_{yx}} = \frac{P_{z_1} + P_{z_2}}{P_{yx_1} + P_{yx_2}}, \quad (1)$$

где P_{z_1} , P_{z_2} – тангенциальные составляющие силы резания, возникающие соответственно на передней и задней поверхностях режущего инструмента, Н; P_{yx_1} , P_{yx_2} – составляющие силы резания P_{yx} , возникающие соответственные на передней и задней поверхностях режущего инструмента в плоскости uox , Н.

На основе этого отношения можно определить влияние износа резца по

задней поверхности $h_{зад}$ на параметры процесса точения, в особенности на изменение коэффициента трения инструментального и обрабатываемого материалов. При условии $\gamma = 0$ (рис. 1) имеем:

$$\frac{P_{yx1}}{P_{z1}} = \frac{P_{z2}}{P_{yx2}} = f, \quad (2)$$

где f – коэффициент трения инструментального и обрабатываемого материалов на передней и задней поверхностях режущего инструмента.

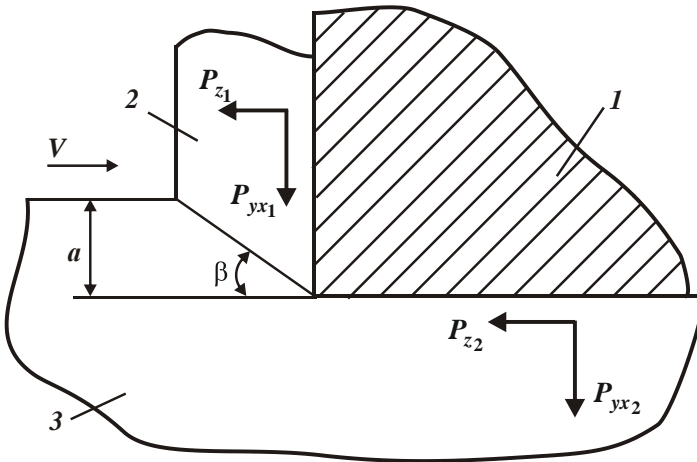


Рисунок 1 – Расчетная схема параметров процесса точения с учетом трения на задней поверхности реза

Подставляя зависимость (2) в (1), получено:

$$\frac{P_z}{P_{yx}} = \frac{P_{z1} + P_{z2}}{f \cdot P_{z1} + \frac{P_{z2}}{f}} = \frac{1 + \frac{P_{z1}}{P_{z2}}}{\frac{1}{f} + f \cdot \frac{P_{z1}}{P_{z2}}}. \quad (3)$$

Как видно, экстремум функции P_z / P_{yx} от переменной величины $P_{z1} / P_{z2} = x$ отсутствует, поскольку необходимое условие экстремума данной

функции $\left(\frac{P_z}{P_{yx}}\right)'_x = 0$ выполняется при значении $f = 1$, а с физической точки зрения должно выполняться условие $f < 1$. В связи с этим отсутствует экстремальное значение переменной величины $P_{z_1} / P_{z_2} = x$.

При условии $P_{z_1} / P_{z_2} = 0$, т.е. при $P_{z_1} = 0$, функция $P_z / P_{yx} = f$. С увеличением переменной величины $P_{z_1} / P_{z_2} = x$ (в связи с уменьшением переменной величины P_{z_2}) числитель и знаменатель функции P_z / P_{yx} непрерывно увеличиваются, т.е. имеет место неопределенность вида $\frac{\infty}{\infty}$.

Для ее раскрытия следует воспользоваться правилом Лопиталья, суть которого состоит в следующем. Для определения предела отношения двух функций $\frac{\delta(x)}{\phi(x)}$, бесконечно больших при условии $x \rightarrow \infty$, можно

рассматривать отношение их производных $\frac{\delta'(x)}{\phi'(x)}$. Если оно стремится к конечному пределу, то к тому же пределу стремится и отношение $\frac{\delta(x)}{\phi(x)}$.

В рассматриваемом случае, согласно зависимости (3), получено:

$$\frac{P_z}{P_{yx}} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{(1+x)'_x}{\left(\frac{1}{f} + f \cdot x\right)'_x} = \frac{1}{f}. \quad (4)$$

Таким образом, с увеличением переменной величины $P_{z_1} / P_{z_2} = x$ функция P_z / P_{yx} непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к значению функции $1/f$. В обобщенном виде график изменения функции P_z / P_{yx} от переменной величины $P_{z_1} / P_{z_2} = x$ показан на рис. 2.

Следовательно, при условии $P_{z_1} < P_{z_2}$ зависимость (3) упрощается и принимает вид:

$$\frac{P_z}{P_{yx}} = f. \quad (5)$$

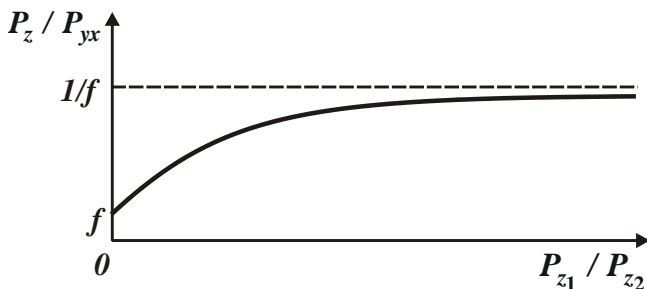


Рисунок 2 – Зависимость P_z / P_{yx} от P_{z_1} / P_{z_2} при условии $\gamma = 0$

В этом случае функция $\frac{P_z}{P_{yx}} = \frac{P_z}{P_y} \cdot \cos \phi$ (где ϕ – главный угол реза в плане) принимает небольшие (меньше единицы) значения, поскольку должно выполняться условие $f < 1$. Эта закономерность справедлива для операций финишной лезвийной и абразивной обработок при съеме небольших припусков с небольшой толщиной среза.

При условии $P_{z_1} > P_{z_2}$ зависимость (3) выражается:

$$\frac{P_z}{P_{yx}} = \frac{1}{f}. \quad (6)$$

В этом случае функция $\frac{P_z}{P_{yx}} = \frac{P_z}{P_y} \cdot \cos \phi$ принимает значения больше единицы, что имеет место при высокопроизводительной обработке на операциях точения, фрезерования и т.д. Полученное аналитическое решение справедливо при условии $\gamma = 0$. При условии $\gamma \neq 0$ функция P_z / P_{yx} примет вид:

$$\frac{P_z}{P_{yx}} = \frac{P_{z_1} + P_{z_2}}{\frac{P_{z_1}}{K_{рез}} + \frac{P_{z_2}}{f}} = \frac{1 + \frac{P_{z_1}}{P_{z_2}}}{\frac{1}{f} + \frac{1}{K_{рез}} \cdot \frac{P_{z_1}}{P_{z_2}}}, \quad (7)$$

где $K_{рез} = ctg(\psi - \gamma)$ – коэффициент резания; ψ – условный угол трения образующей стружки с передней поверхностью инструмента, град.; γ – положительный передний угол инструмента, град.

Зависимость (7) отличается от прежней зависимости (3) наличием в знаменателе функции $1/K_{рез}$ (вместо функции f). Характер изменения функции P_z/P_{yx} остается прежним (рис. 3): с увеличением переменной величины $P_{z1}/P_{z2} = x$ функция P_z/P_{yx} непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к значению $K_{рез} = ctg(\psi - \gamma)$.

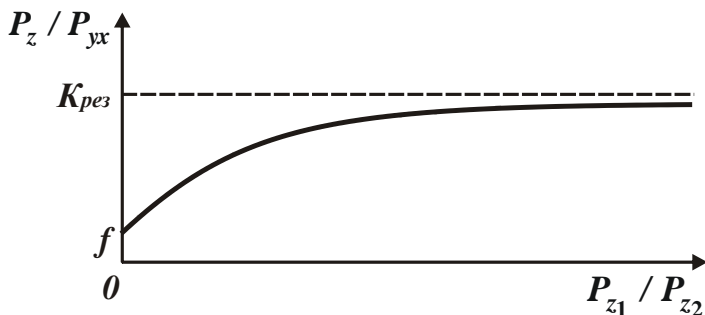


Рисунок 3 – Зависимость P_z / P_{yx} от P_{z1} / P_{z2} при условии $\gamma \neq 0$

При шлифовании справедлива зависимость (7), рассматривая в ней коэффициент трения f как коэффициент трения связки круга с обрабатываемым материалом, а коэффициент резания в виде $K_{рез} = ctg(\psi + \gamma)$.

5. Результаты расчетов и их анализ. Теоретические решения согласуются с экспериментальными данными, полученными профессором Коломойцем В.В. [4] при точении резцами из эльбора-Р и твердого сплава Т15К6 с передним углом, близким к нулю (табл. 1). С увеличением величины износа резца по задней поверхности $h_{зад}$ тангенциальная P_z и радиальная P_y составляющие силы резания увеличиваются, а их отношение P_z/P_y , наоборот, уменьшается.

Таблица 1 – Значения параметров P_z , P_y , P_z / P_y

Эльбор-Р				Твердый сплав Т15К6		
$h_{зад}$, мм	P_z , Н	P_y , Н	P_z / P_y	P_z , Н	P_y , Н	P_z / P_y
0,05	110	50	2,2	150	30	5,0
0,1	140	100	1,4	180	120	1,5
0,2	200	220	0,91	255	305	0,835
0,3	260	340	0,765	330	500	0,66
0,4	320	460	0,695	400	685	0,595
0,5	370	580	0,637	470	885	0,53
0,6	440	720	0,612	540	1080	0,5

В табл. 2 приведены расчетные значения функции $\frac{P_z}{P_{yx}} = \frac{P_z}{P_y} \cdot \cos \phi$, рассматривая главный угол резца в плане $\phi = 45^\circ$ для наименьшего ($h_{зад} = 0,05$ мм) и наибольшего ($h_{зад} = 0,6$ мм) значений $h_{зад}$. Тогда, исходя из зависимости (3), при точении резцами из эльбора-Р с $h_{зад} = 0,05$ мм коэффициент трения равен $f = \frac{1}{1,56} = 0,64$, а с $h_{зад} = 0,6$ мм коэффициент трения равен $f = 0,43$. Очевидно, дальнейшее увеличение величины $h_{зад} < 0,05$ мм позволит увеличить отношения P_z / P_y , P_z / P_{yx} и, соответственно, уменьшить коэффициент трения до значения $f = 0,43$. В этом случае выполняются соотношения (2), поскольку коэффициент трения f принимает одинаковое значение $f = 0,43$ для наименьшего ($h_{зад} = 0,05$ мм) и наибольшего ($h_{зад} = 0,6$ мм) значений $h_{зад}$.

Таблица 2 – Значения параметров P_z , P_y , P_z / P_y

Эльбор-Р				Твердый сплав Т15К6		
$h_{зад}$, мм	P_z / P_y	P_z / P_{yx}	f	P_z / P_y	P_z / P_{yx}	f
0,05	2,2	1,56	0,64	5,0	3,5	0,29
0,6	0,612	0,43	0,43	0,5	0,35	0,35

Аналогична закономерность изменения коэффициента трения при точении резцами из твердого сплава Т15К6 (табл. 2). При $h_{зад}=0,05$ мм отношение $P_z/P_{yx}=3,5$, а коэффициент трения f , определяемый из зависимости (3), равен $f=0,29$. При $h_{зад}=0,6$ мм коэффициент трения $f=0,35$. Следовательно, увеличением величины $h_{зад}>0,6$ мм можно добиться уменьшения отношения P_z/P_{yx} до значения, равного 0,29. Это приведет к выполнению условия (2) и позволит установить коэффициент трения, который в этом случае будет равен $f=0,29$. Сравнивая полученные значения коэффициентов трения f , видно, что при точении резцами из эльбора-Р коэффициент трения больше, чем при точении резцами из твердого сплава Т15К6. Это может быть связано с повышенной температурой резания при точении резцами из твердого сплава Т15К6, что, как известно, приводит к уменьшению коэффициента трения.

Необходимо отметить, что при точении резцами из различных инструментальных материалов с увеличением величины $h_{зад}$ температура резания увеличивается, а коэффициент трения, наоборот, уменьшается. В этом случае сложно добиться точного выполнения условия (2). Поэтому можно ограничиться приближенными значениями коэффициента трения, полученными при наименьшем и наибольшем значениях величины $h_{зад}$. Очевидно, при наибольшем значении величины $h_{зад}$ коэффициент трения меньше в связи с повышенной температурой резания.

Таким образом, на основе оценки и анализа долей энергий резания и трения в общем энергетическом балансе процесса механической обработки предложена новая методика определения коэффициента трения инструментального и обрабатываемого материалов при точении с учетом износа резца по задней поверхности.

Выводы. В работе предложена новая математическая модель определения параметров силовой напряженности процесса резания при точении и разработана методика определения коэффициента трения инструментального и обрабатываемого материалов на передней и задней поверхностях резца на основе оценки и анализа долей энергий резания и трения в общем энергетическом балансе процесса механической обработки с учетом износа резца по задней поверхности. Получены аналитические соотношения составляющих силы резания, согласно которым

экспериментально установленный коэффициент трения принимает одинаковые значения для наименьшей и наибольшей величины износа реза по задней поверхности, что свидетельствует о достоверности предложенного теоретического решения.

Список использованных источников: 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 / *Т. Н. Лоладзе.* – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией *Ф. В. Новикова* и *А. В. Якимова*. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2003.– Т. 3. “Резание материалов лезвийными инструментами”. – 546 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Bobrov V. F.* Osnovy teorii rezaniya metallov / *V. F. Bobrov.* – М.: Mashinostroyeniye, 1975. – 343 s. 2. *Granovskiy G. I.* Rezaniye metallov: uchebnik / *G. I. Granovskiy, V. G. Granovskiy.* – М.: Vysshaya shkola, 1985. – 304 s. 3. *Loladze T. N.* Prochnost' i iznosostoykost' rezhushchego instrumenta / *T. N. Loladze.* – М.: Mashinostroyeniye, 1982. – 320 s. 4. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya / Pod obshchey redaktsiyey *F. V. Novikova* i *A. V. Yakimova*. V desyati tomakh. – Odessa : ONPU, 2003.– T. 3. “Rezaniye materialov lezviynymi instrumentami”. – 546 s.

Поступила в редколлегию 25.06.2018