

Ф.В. НОВИКОВ, докт. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;

Т.М. БРИЖАН, ГВУЗ "ПГТУ", Мариуполь;

А.Г. КРЮК, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;

О.С. КЛЕНОВ, канд. техн. наук, Фирма "ДиМерус Инженеринг", Харьков

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

В статье предложена математическая модель механики процесса резания и приведены аналитические зависимости для определения основных параметров силовой напряженности процесса резания, включая силу резания, энергоемкость обработки, коэффициент усадки стружки. Теоретически показано, что основным путем их уменьшения является улучшение условий стружкообразования за счет уменьшения радиальной составляющей силы резания, используя различные способы дробления стружки, снижая коэффициент трения обрабатываемого и инструментального материалов, изменяя угол схода стружки с передней поверхности резца и т.д.

Ключевые слова: механическая обработка, инструмент, обрабатываемый материал, сила резания, энергоемкость обработки, коэффициент усадки стружки, производительность обработки.

Введение. Из всего разнообразия технологий обработки материалов, основанных на использовании различных видов энергии, необходимо выделить механические технологии обработки материалов резанием, которые характеризуются наименьшей энергоемкостью и наибольшей производительностью обработки и обеспечивают высокие показатели качества и точности обрабатываемых поверхностей. Процессы резания материалов получили широкое применение в производстве и в ближайшие годы не утратят своей значимости. Вместе с тем, технологические возможности процессов резания используются не в полной мере, что связано с их недостаточной изученностью с точки зрения условий уменьшения параметров силовой напряженности процесса резания. В связи с этим актуальными являются задачи их дальнейшего исследования на основе разработки математической модели механики процесса резания, позволяющие с единых позиций оценить технологические возможности повышения производительности и качества обработки.

Анализ последних достижений и литературы. Вопросам механики процесса резания в научно-технической литературе уделено большое внимание [1-3]. Разработаны методики определения силы резания для различных видов об-

работки [4]. Однако, отсутствие аналитических зависимостей, увязывающих основные параметры силовой напряженности процесса резания, включая составляющие силы резания, энергоемкость обработки, коэффициент усадки стружки и др., затрудняет анализ технологических закономерностей процесса резания и условий повышения его эффективности. В особой мере 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, постановка проблемы. Целью работы является обоснование условий повышения процессов резания на основе аналитического определения и анализа параметров силовой напряженности процесса резания.

Материалы исследования. В основу работы положены результаты исследований [5], согласно которым тангенциальная P_z и радиальная P_y составляющие силы резания описываются зависимостями:

$$P_z = \sigma \cdot S = \frac{a \cdot b \cdot \sigma_{сж}}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right); \quad (1)$$

$$P_y = \frac{\sigma \cdot S}{K_{рез}} = \frac{a \cdot b \cdot \sigma_{сж}}{K_{рез}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right), \quad (2)$$

где σ – энергоемкость обработки, Дж/м³ (или Н/м²):

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right) = \frac{\sigma_{сж}}{tg\beta}; \quad (3)$$

$S = a \cdot b$ – площадь поперечного сечения среза, м²; a , b – толщина и ширина среза, м; $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²; $K_{рез} = P_z / P_y = tg2\beta = ctg(\psi - \gamma)$ – коэффициент резания; β – условный угол сдвига материала; ψ – условный угол трения на передней поверхности инструмента ($tg\psi = f$ – коэффициент трения); γ – передний угол инструмента.

Удельные составляющие силы резания описываются зависимостями:

$$P_{z_{y\delta}} = \frac{P_z}{a \cdot v \cdot \sigma_{сж}} = \frac{1}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right); \quad (4)$$

$$P_{y_{y\delta}} = \frac{P_y}{a \cdot v \cdot \sigma_{сж}} = \frac{1}{K_{рез}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right). \quad (5)$$

Из зависимостей (4) и (5) следует, что параметры $P_{z_{y\delta}}$ и σ идентичны, т.к. описываются одной и той же зависимостью. Анализ рассчитанных на основе зависимостей (4) и (5) значений $P_{z_{y\delta}}$ и $P_{y_{y\delta}}$, которые приведены на рис. 1а, 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 соответственно условия $P_{z_{y\delta}} < P_{y_{y\delta}}$ и $P_{z_{y\delta}} > P_{y_{y\delta}}$.

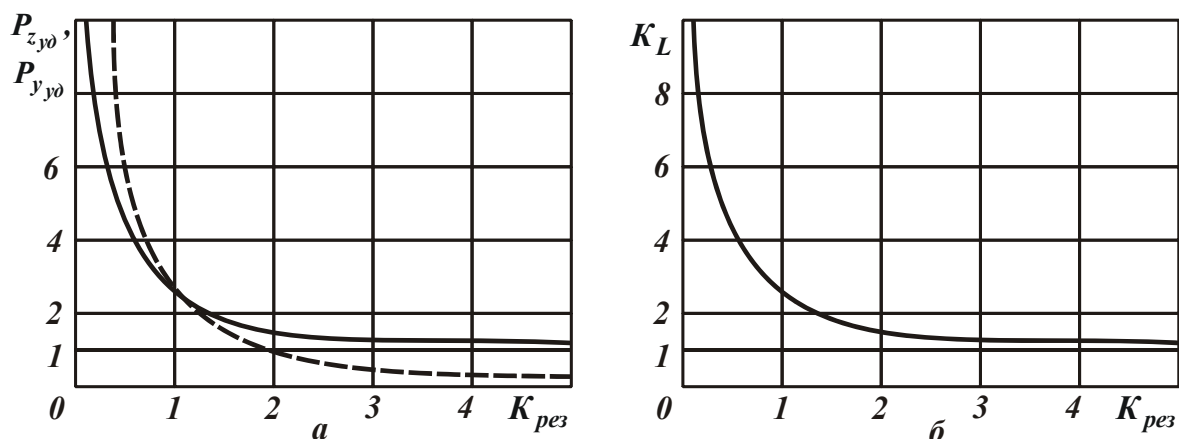


Рис. 1. Зависимости $P_{z_{y\delta}}$ (сплошная линия) и $P_{y_{y\delta}}$ (пунктирная линия)

от $K_{рез}$ (а) и K_L от $K_{рез}$ (б).

Как известно, условие $K_{рез} < 1$ реализуется при абразивной обработке, а условие $K_{рез} > 1$ – при лезвийной обработке [6]. 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 составляю-

щие 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. Данная закономерность обусловлена меньшими значениями условного напряжения резания $\sigma = P_{z_{y\delta}}$, которое 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 известной формулы профессора Тиме А.Н.: $tg\beta = \frac{\cos\gamma}{K_L - \sin\gamma}$ за-

висимость (3) выразится:

$$\sigma = \sigma_{сж} \cdot \frac{(K_L - \sin\gamma)}{\cos\gamma}, \quad (6)$$

где K_L – коэффициент усадки стружки.

Поскольку $K_L \gg \sin\gamma$, а $\cos\gamma \approx 1$, то зависимость (6) в первом приближении может быть упрощена и представлена в виде:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{сж}} = K_L. \quad (7)$$

Таким образом показано, что энергоемкость обработки σ определяет коэффициент усадки стружки K_L : чем больше σ , тем больше K_L .

Подставляя зависимость (3) в (7), имеем:

$$K_L = \frac{1}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right). \quad (8)$$

Зависимость (8) может быть разрешена относительно $K_{рез}$:

$$K_{рез} = \frac{2 \cdot K_L}{(K_L^2 - 1)}. \quad (9)$$

В таблице и на рис. 1б приведены рассчитанные по зависимости (8) значения K_L . Как видно, коэффициент усадки стружки K_L резко уменьшается в диапазоне $K_{рез} < 1$ и незначительно изменяется в диапазоне $K_{рез} > 1$, неограни-

ченно приближаясь к значению $K_L \rightarrow 1$. следовательно, основные изменения K_L происходят в диапазоне $K_{рез} < 1$.

Таблица. Расчетные значения K_L

$K_{рез}$	0	1	2	3	4	5	10
K_L	∞	2,41	1,62	1,38	1,28	1,22	1,1

Результаты исследований. Исходя из приведенной зависимости $K_{рез} = P_z / P_y = tg 2\beta = ctg(\psi - \gamma)$, уменьшение коэффициента резания $K_{рез}$ связано с уменьшением условного угла сдвига обрабатываемого материала β за счет увеличения разности углов $(\psi - \gamma)$, т.е. увеличения условного угла трения на передней поверхности инструмента ψ и уменьшения переднего угла инструмента γ . В особой мере это проявляется при шлифовании, когда угол γ становится отрицательным и зависимость для определения коэффициента резания принимает вид $K_{рез} = P_z / P_y = tg 2\beta = ctg(\psi + \gamma)$. 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 , энергоемкости обработки σ 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 , σ и K_L являются уменьшение угла ψ и увеличение положительного угла γ (при лезвийной обработке) и уменьшение отрицательного угла γ (при абразивной обработке). При резании алмазным лезвийным инструментом, характеризующимся наименьшим коэффициентом трения на передней поверхности инструмента, разность 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 , σ и K_L .

Заслуживает внимания факт, что значениями $K_L > 2$ 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 (1), 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 (2), приблизительно равна ее экспериментальному значению. Поэтому между составляющими силы резания P_z и P_y , описываемыми зависимостями (1) и (2), 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 по-

верхностью резца. 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 приведены аналитические зависимости для определения основных параметров силовой напряженности процесса резания: силы резания, энергоемкости обработки, коэффициента усадки стружки. Теоретически показано, что основным путем их уменьшения является улучшение условий стружкообразования за счет уменьшения радиальной составляющей силы резания, используя различные способы дробления стружки, снижая коэффициент 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. – 343 с. 2. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с. 3. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н.Н. Зорев. – М.: Машгиз, 1956. – 368 с. 4. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 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. 1. "Механика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 6. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков и др. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.