

ОЦЕНКА СИЛОВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРИ ТОЧЕНИИ РЕЗЦАМИ С КРУГЛЫМИ ПЛАСТИНАМИ ПОСРЕДСТВОМ «ЭКВИВАЛЕНТНЫХ» ПАРАМЕТРОВ

Для анализа составляющих силы резания при точении резцами с круглыми пластинами, которое характеризуется переменной толщиной срезаемого слоя и неопределенностью главного угла в плане φ , вводится понятие «эквивалентного» главного угла в плане φ_m , определяющего также эквивалентную толщину срезаемого слоя a_m . На основе статистического анализа экспериментальных данных показано, что параметры φ_m и a_m адекватно отражают влияние режимов резания на соотношение составляющих силы резания и могут быть использованы для их оценки.

Ключевые слова: резец, круглая пластина, главный угол в плане, толщина срезаемого слоя, составляющие силы резания, эквивалентные параметры.

Из всех геометрических параметров основным фактором, влияющим на процесс резания различных материалов, в том числе и жаропрочных сплавов, по данным фирмы *Sandvic Coromant* является главный угол в плане φ [1], непосредственно влияющий на надежность и производительность обработки. От него зависит толщина срезаемого слоя; он оказывает решающее воздействие на выбор подачи – небольшой угол обеспечивает тонкую стружку, в результате чего значение подачи может быть выбрано больше; угол φ влияет на силу резания и геометрическую проходимость инструмента. В конечном итоге, он оказывает решающее воздействие на эффективность применения инструментального материала. По данным [1], наиболее благоприятным значением главного угла в плане является угол в 45° и меньше, а наиболее неблагоприятным – 90° .

Применение круглых пластин получило широкое распространение в настоящее время – их прочность дает возможность делать режущую кромку более острой; большой радиус круглой пластины не ограничивает подачу с точки зрения качества обработанной поверхности; круглые пластины универсальны в программировании, что важно для профильной обработки и обработки карманов [1].

При использовании круглых пластин толщина срезаемого слоя является величиной переменной, а главный угол в плане неопределенным, что затрудняет проведение анализа силовых и прочих характеристик процесса резания. Для учета этого факта, в работе [2] предложено ввести понятие «эквивалентной толщины срезаемого слоя», определяемой как

$$a_m = \frac{A_m}{b_m}, \quad (1)$$

где A_m – площадь срезаемого слоя, мм; b_m – ширина срезаемого слоя, мм.

Там же показана возможность использования эквивалентной толщины срезаемого слоя для расчета составляющих силы резания. Следует отметить, что приведенные в [2] зависимости и исследования относятся к малым радиусам закругления вершины инструмента – когда подача S соизмерима с радиусом закругления r . Для анализа же закономерностей процесса резания круглыми пластинами, когда $S \ll r$ – есть смысл ввести «эквивалентный угол в плане» φ_m . Этот угол определяет сечение, в котором толщина срезаемого слоя равна эквивалентной [3]. При условии, что $t < r$, с погрешностью не более 0,1 % – φ_m может быть определен как:

$$\sin \varphi_m = \frac{t}{r \arccos\left(1 - \frac{t}{r}\right)}, \quad (2)$$

где t – глубина резания, мм; r – радиус пластины, мм.

При этом, сама эквивалентная толщина срезаемого слоя будет определяться по известной формуле:

$$a_m = S \sin(\varphi_m), \quad (3)$$

где S – подача, мм/об.

Для экспериментальной проверки допустимости использования такого понятия как «эквивалентный угол в плане» при обработке круглыми пластинами, необходимо иметь данные, устанавливающие связь между режимами резания (глубиной и подачей) и составляющими силы резания P_x и P_y . Тогда, принимая во внимание некоторые выводы работы [4], а также анализируя значения уже классических коэффициентов K_φ для определения составляющих силы резания, зависящих от угла в плане [5] – для углов менее 45° можно записать, что

$$\operatorname{tg}(\varphi) \approx \frac{P_x}{P_y} \quad (4)$$

Экспериментальные данные, достаточные для оценки предлагаемого подхода, изложены в работе [6], и весь приведенный ниже анализ опирается на результаты экспериментов, опубликованных в этой работе. Здесь исследовалось, в том числе, влияние глубины резания и подачи на составляющие силы резания, полученные при точении силуминового сплава АЛ25 круглой пластиной RNMN120300 (диаметр 12,7 мм). Полученные экспериментальные данные (P_x и P_y); результаты расчета эквивалентных параметров φ_m и a_m по формулам

(2)–(3), а также расчет угла φ по формуле (4) представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Как следует из приведенных данных и на основании расчета коэффициентов корреляции (см. табл. 2) – при изменении t от 0,1 до 0,5 мм, а подачи S от 0,05 до 0,1 мм/об – угол φ изменяется в пределах $3^\circ \dots 12^\circ$, что хорошо коррелирует с расчетным эквивалентным углом φ_m и глубиной резания t . С подачей же S корреляционной связи практически нет. Там же дана оценка статистической значимости полученных результатов (для ее подтверждения должно соблюдаться условие $t > t_{0,05}$ [7]).

Таблица 1 – Экспериментальные и расчетные данные

Эксперимент			Составляющие силы резания, H		Угол в плане φ		Расчетные эквивалентные параметры		
№	t , мм	S , мм/об	P_x	P_y	$\operatorname{tg} \varphi$	φ°	φ_m°	$\operatorname{tg} \varphi_m$	a_m , мм
1	0,1	0,050	3,0	35,8	0,08380	4,793	5,0859	0,0890	0,0044
2	0,2	0,050	7,0	51,0	0,13725	7,819	7,1931	0,1262	0,0063
3	0,3	0,050	10,0	62,0	0,16129	9,167	8,8098	0,1550	0,0077
4	0,4	0,050	12,0	69,0	0,17391	9,871	10,1725	0,1794	0,0088
5	0,5	0,050	16,5	78,0	0,21154	11,950	11,3729	0,2011	0,0099
6	0,1	0,075	2,4	38,7	0,06202	3,550	5,0849	0,0890	0,0066
7	0,2	0,075	6,5	57,7	0,11265	6,431	7,1923	0,1262	0,0094
8	0,3	0,075	11,3	70,2	0,16097	9,149	8,8091	0,1550	0,0115
9	0,4	0,075	14,9	85,1	0,17509	9,936	10,1720	0,1794	0,0132
10	0,5	0,075	20,2	94,6	0,21353	12,060	11,3725	0,2011	0,0148
11	0,1	0,100	3,5	34,7	0,10086	5,763	5,0834	0,0890	0,0089
12	0,2	0,100	7,1	52,3	0,13576	7,735	7,1913	0,1262	0,0125
13	0,3	0,100	12,4	71,7	0,17294	9,817	8,8083	0,1550	0,0153
14	0,4	0,100	17,1	88,2	0,19388	10,978	10,1713	0,1794	0,0177
15	0,5	0,100	21,8	101,7	0,21436	12,105	11,3718	0,2011	0,0197

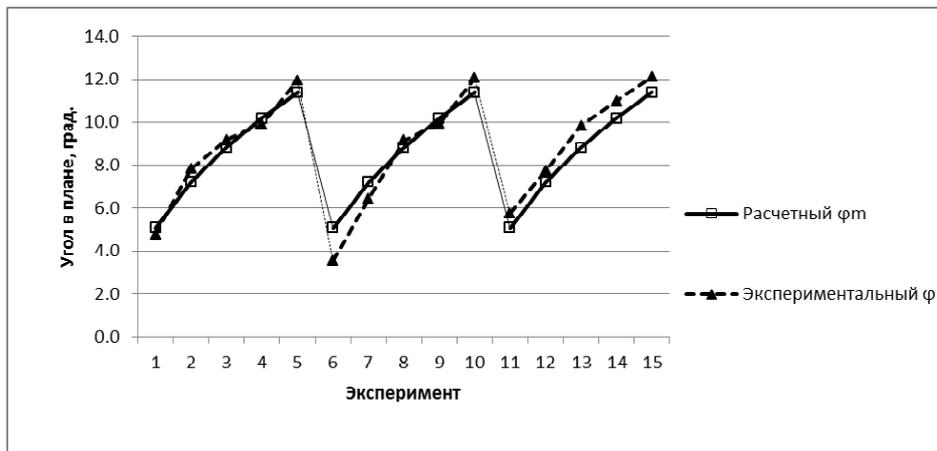


Рис. 1. Значения угла в плане φ , полученные из экспериментальных данных, и расчетного эквивалентного угла в плане φ_m

Таблица 2 – Корреляция угла φ

		φ_m	t	S
φ	Коэффициент корреляции ρ	0,97	0,96	0,09
	95 % доверительный интервал ρ	0,92	0,89	-0,44
		0,99	0,99	0,57
	Уровень значимости (критерий Стьюдента t)	14,97	12,74	0,32
Критическое значение критерия Стьюдента $t_{0,05}$		2,14		

Как видно из табл. 2, статистически значимыми являются связи φ только с φ_m и t , что вполне объясняется уравнением (2).

Интерес также представляет анализ корреляции силы резания P с параметрами срезаемого слоя – см. табл. 3, где представлены коэффициенты множественной корреляции s и оценка их значимости.

Из приведенных данных следует, что эквивалентная толщина срезаемого слоя a_m наряду с глубиной резания (или шириной срезаемого слоя b_m) являются более информативными, статистически значимыми показателями для анализа силы резания и ее составляющих, чем подача S , прямое влияние которой в рассматриваемых условиях статистически незначимо.

Если угол φ_m является моделью главного угла в плане φ , отражающей соотношение между составляющими силы резания, и как показано выше, не зависит от подачи S – результаты, полученные в трех сериях экспериментов с разными значениями подачи $S(0,05; 0,075$ и $0,1$ мм/об) должны представлять однородные выборки с равным средним. Наибольшая дисперсия получена при $S = 0,075$ мм/об – $S_2^2 = 0,0033$, а наименьшая – при $S = 0,1$ мм/об – $S_3^2 = 0,0019$. Проверка однородности по F – критерию Фишера дает значение $F = S_2^2/S_3^2 = 1,68$ при критическом значении $F_{кр} = 6,39$ (для доверительной вероятности 0,95). Так как $F < F_{кр}$ – дисперсии однородны. Для проверки равенства средних значений φ_m по [7] вычисляется t -критерий Стьюдента: $t = 0,57$ – критическое значение которого $t_{0,05} = 2,3$, т. е. средние равны. Таким образом, можно заключить, что φ_m действительно отражает соотношение между составляющими P_x и P_y практически не зависящее от подачи.

Еще одна задача, требующая решения, – проверка адекватности модели φ_m , нелинейность которой не дает возможность непосредственно использовать для этого

F -критерий Фишера. Тем не менее, адекватность может быть оценена при помощи некоторых других показателей [8], приведенных в таблице 4.

Принимая во внимание результаты расчетов, приведенные в табл. 4, модель для φ_m можно считать адекватной.

Выводы

1. Геометрическим параметром, оказывающим решающее воздействие на эффективность обработки резанием, ее производительность и надежность, а также на выбор подачи является главный угол в плане φ .

2. Получившая широкое распространение обработка круглыми пластинами характеризуется переменными вдоль режущей кромки толщиной срезаемого слоя и главным углом в плане φ , что затрудняет анализ характеристик процесса резания. Для учета этого факта предлагается использовать «эквивалентный угол в плане» φ_m и «эквивалентную толщину срезаемого слоя» a_m .

3. На основе статистического анализа экспериментальных данных показано, что при обработке круглыми пластинами эквивалентный угол в плане φ_m адекватно характеризует соотношение между составляющими силы резания P_x и P_y . Как и следует из теоретической модели, его величина зависит от глубины резания t , радиуса пластины r и не зависит от величины подачи S .

4. Для анализа силы резания P (при обработке круглыми пластинами) наиболее информативными параметрами являются глубина резания t и эквивалентная толщина срезаемого слоя a_m . Сама по себе подача S для этих целей является наименее информативным параметром.

5. Экспериментально и статистически обоснована возможность применения эквивалентных параметров φ_m и a_m для анализа силовых характеристик процесса резания круглыми пластинами.

Таблица 3 – Корреляция силы резания P

		$t(b_m)$	a_m	S
P	Коэффициент корреляции ϱ	0,95	0,84	0,22
	95% доверительный интервал ϱ	0,85	0,57	-0,33
	Уровень значимости (критерий Стьюдента t)	0,98	0,95	0,65
	Критическое значение критерия Стьюдента $t_{0,05}$	11,4	5,8	0,84
		2,14		

Таблица 4 – Критерии оценки адекватности модели φ_m

№	Наименование критерия	Допустимые и идеальные значения критерия	Расчетное значение критерия
1.	Средняя относительная ошибка A , %	$0\% \leq A < 10\%$ – высокая точность модели $10\% \leq A < 20\%$ – хорошая точность	9,0%
2.	Коэффициент относительной ошибки Тейла, U	$0 \leq U \leq 1$ $U \rightarrow 0$	0,024
3.	Коэффициент детерминации (доля объясненной дисперсии), R^2	$0 \leq R^2 \leq 1$ $R^2 \rightarrow 1$	0,80

Список литературы

1. Sandvik Coromant, Энергетическая промышленность. Современные инструменты и методы для эффективной обработки. – Sandvik Coromant, 2012. – 28 с.
2. Degner W. Die Mathematische der Schnittkraft in bereich klein spanungsdickn / Degner W., Hommel B. // Wissenschaftlich Zeitschrift Technische Hochschulen. – 1977. – Т. 19, № 1. – С. 63–71.
3. Фролов М. В. Расчет параметров процесса резания с глубиной, соизмеримой с радиусом при вершине резца / Фролов М. В, Львова Е. В. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1989. – № 9. – С. 127–130.
4. Силин С. С. Метод подобия при резании материалов / Силин С. С. – М. : Машиностроение, 1979. – 152 с.
5. Косилова А. Г. Справочник технолога машиностроителя, т. 2 / Косилова А. Г., Мещеряков Р. П. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
6. Стахнив Н. Е. Исследование изменений силы резания при точении силуминов резцами с круглыми алмазно–твердосплавными пластинами / Стахнив Н. Е., Девин Л. Н., Сулима А. Г. // Сверхтвердые материалы. – 2010. – № 5. – С. 88–99.
7. Кацев П. Г. Статистические методы исследования режущего инструмента / Кацев П. Г. – М. : Машиностроение, 1974. – 231 с.
8. Васильев А. А. Критерии селекции моделей прогноза (обзор) / Васильев А. А. // Вестник ТвГУ. Серия Экономика и управление. – 2012. – № 13. – С. 133–148.

Одержано 10.03.2015

Фролов М.В. Оцінка силових залежностей при точінні різцями з круглими пластинами за допомогою «еквівалентних» параметрів

Для аналізу складових сили різання при точінні різцями з круглими пластинами, яке характеризується змінною товщиною шару, що зрізується, та невизначеністю головного кута в плані Φ , вводиться поняття «еквівалентного» кута в плані Φ_m , що визначає також еквівалентну товщину шару, що зрізується a_m . На основі статистичного аналізу експериментальних даних показано, що параметри Φ_m та a_m адекватно відображають вплив режимів різання на співвідношення складових сили різання та можуть бути використані для їх оцінки.

Ключові слова: різець, кругла пластина, головний кут у плані, товщина шару що зрізується, складові сили різання, еквівалентні параметри.

Frolov M. Evaluation of force dependences of turning by the cutters with round inserts by means of «equivalent» parameters

For cutting force components analysis at the process of turning by cutters with round inserts, that is characterized by variable cutting layer thickness and by indeterminate main plain angle Φ – «equivalent» plane angle Φ_m term is proposed that defines also equivalent cutting layer thickness a_m . On the basis of experimental data statistical analysis it is demonstrated that Φ_m and a_m parameters reflect adequately cutting conditions influence at cutting force components ratio and can be used for ones evaluation.

Key words: cutter, round insert, the main plane angle, cutting layer thickness, cutting force components, equivalent parameters.