

резания практически отсутствуют;

5. С учётом, что сама сила резания является переменной в широком диапазоне параметров резания, что весьма усложняет её определение и использование, представляет интерес вопрос оценки заданной точности определения усилий резания как в уже разработанных алгоритмах и формулах, так и оценки перспектив её повышения при значительном росте количества учитываемых параметров.

Гипотеза о точности расчёта силы резания. Разработка математической модели

к.т.н. доц. Волков А.В., Матвеев С.В.
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
89065088371, 89206113144

Аннотация. Проведена оценка возможностей априорного определения точности расчёта силы резания в случае значительного роста учитываемого количества параметров резания. Разработана гипотетическая математическая модель предварительной оценки точности расчётов сил резания при точении конструкционных сталей. В качестве гипотетической модели предложена гиперболическая зависимость погрешностей усилия резания от количества параметров, определяющих процесс резания. Даны рекомендации по оценке точности определения усилия резания в зависимости от количества учитываемых параметров процесса, а также - по проведению с помощью разработанной модели априорных оценок погрешностей расчёта усилия резания в подмодулях CAD/CAM/CAE/PDM – систем.

Ключевые слова: математическая модель, точение, усилие резания, система резания, параметры, факторы, гипотеза о точности, погрешности, взаимосвязи и взаимовлияние, гиперболическая зависимость.

(Начало см. Гипотеза о точности расчёта силы резания. Параметры резания).

Из предшествующего анализа становится ясным, что система резания создана, в некотором смысле, на основе понятия усилия резания, т.е. практически все составляющие системы резания в той или иной степени взаимосвязаны и взаимозависят от подсистемы усилия резания. Именно поэтому подсистема усилия резания в некоторых случаях предварительного анализа может подменить саму систему резания, тем самым приобретя некоторые черты и свойства самой системы резания, и, в частности, восприятия оценки Ю.М. Ермакова в $3,8 \cdot 10^{31}$ параметров системы и их взаимодействий [6], которая затем может быть распространена и на основу предварительного анализа этой подсистемы. Например, можно вполне обоснованно представить, что подсистема усилия резания имеет лишь на порядок меньше подпараметров и составляющих взаимодействий, чем вся система резания. С довольно малой погрешностью не противоречат оценке Ю.М. Ермакова и версии, согласно которым число подпараметров подсистемы усилия резания примерно равно полной оценке Ю.М. Ермакова, т.к. на сжатой функциональной шкале графика функции в 31 степени точки со степенями, отличающимися на единицу, в конце шкалы просто сольются.

Имея в виду оценку Ю.М. Ермакова в $3,8 \cdot 10^{31}$ параметров системы резания и их взаимодействий, с точки зрения чисто аналитического подхода для расчёта выходных параметров, исследователям можно было бы опустить руки и перейти исключительно на эмпирические методы определения режимов резания, как это сделали многие зарубежные коллеги [13, 14]. Однако не всё так однозначно. Опыт многих научных школ показывает, что путём решения задач даже в узких рамках механики резания, при условии оптимальной алгоритмизации, композиции и декомпозиции групп параметров, их основных характеристик, к настоящему времени для значительного числа конкретных схем резания, материалов и инструментов уже выполнены аналитические расчёты усилий резания с довольно высокой точностью, т.е. в пределах 10 – 30% [4, 7, 11, 12, 15].

Погрешности расчёта усилия резания по упрощённому уравнению Г.И. Грановского [3]

Обрабатываемый материал и его характеристики: σ_B , ГПа	Режимы резания: t мм / S мм/об / v м/мин	Коэффициент K_r по Г.И. Грановскому кН /передний угол резца, γ° [3]	Усилие резания по расчёту Г.И. Грановского кН	Усилие резания по эксперименту кН (источники - см. ссылку)	Погрешность расчёта усилия резания по формуле Г.И. Грановского, %	Ссылка
Ст.10, $\sigma_B = 0,575$ ГПа	3/0,291/188	2,5/0	1,25	1,51	- 17,2	Табл.10 [18]
Ст.10, $\sigma_B = 0,575$ ГПа	3/0,291/33	2,5/0	1,25	2,49	- 49,8	Табл.10 [18]
Ст.10, $\sigma_B = 0,575$ ГПа	3/0,291/33	2,5/20	1,25	1,76	- 29,0	Табл.10 [18]
Ст.10, $\sigma_B = 0,575$ ГПа	3/0,291/188	2,5/20	1,25	1,21	3,3	Табл.10 [18]
Ст.10, $\sigma_B = 0,398$ ГПа	4/0,51/47	2,5/20	2,03	4,23	- 52,0	Табл. на с.30 [17]
Ст.10, $\sigma_B = 0,398$ ГПа	4/0,51/182	2,5/10	2,03	3,06	- 33,7	Табл. на с.30 [17]
Ст.50, $\sigma_B = 0,714$ ГПа	12/0,85/19	2,5/20	18,2	16,82	8,2	Табл. на с.30 [17]
Ст.50, $\sigma_B = 0,714$ ГПа	12/0,85/72	2,5/10	18,2	16,16	12,6	Табл. на с.30 [17]
Ст.50, $\sigma_B = 0,714$ ГПа	12/1,42/52	2,5/10	30,42	26,5	14,8	Табл. на с.30 [17]
Ст.50, $\sigma_B = 0,714$ ГПа	12/2,38/37	2,5/10	51,0	45,87	11,2	Табл. на с.30 [17]

В этой связи представляет несомненный интерес вопрос обеспечения заданной точности определения усилий резания с учётом представлений Ю.М. Ермакова и других исследователей как в уже разработанных алгоритмах и формулах, не имеющих оценки точности, так и в перспективных разработках.

Естественно предположить, и предварительный анализ это доказывает, что реальная точность определения параметра усилия резания, интегрально отражающего весь процесс резания и в значительной степени зависящего от множества характеристик системы станок-приспособление-инструмент-деталь-среда (СПИДС), будет зависеть от большинства параметров системы резания. Точность определения усилия резания на пределе доступных для практики погрешностей может быть установлена при числе вариантов взаимодействий параметров, по Ю.М. Ермакову, не менее $3,8 \cdot 10^{31}$, с погрешностью, например, 0,1%, что вполне объяснимо и сверху и снизу при столь экстремальном количестве вариантов взаимодействия в подсистеме.

Положим теперь, что имеется зависимость, определяющая функциональную связь точ-

ности расчёта усилия резания с количеством учитываемых параметров процесса резания. Причём данная зависимость с большой долей вероятности должна представлять собой уравнение второго порядка, а точнее, гиперболу. Имея данные такой зависимости всего лишь по пяти точкам, возможно точное её построение [16]. Для простоты будем считать, что данная кривая должна быть равнобочной гиперболой, расположенной в первом квадранте, т.к. можно предположить, что оба её луча стремятся к числу сочетаний $3,8 \cdot 10^{31}$ с одинаковой скоростью (первый по оси y - при значительном возрастании погрешности расчёта с одним расчётным параметром, либо одной характеристикой этого единственного параметра, а второй - по оси x - при снижении погрешности расчёта усилия резания до весьма малой величины при стремлении количества параметров к числу сочетаний, по Ю.М. Ермакову). После роста погрешности до сотни процентов положение левого луча станет несущественным для анализа, и его положением, имея в виду целесообразность упрощения зависимости, можно будет пренебречь.

Таким образом, первоначально мы можем иметь две точки кривой, обусловленные как долями процента погрешности при максимальном числе параметров и их сочетаний по Ю.М. Ермакову, так и, бесспорно, весьма высокой погрешностью при незначительном количестве учитываемых параметров резания. Определив ещё три точки из имеющихся литературных данных по точности расчёта усилий резания при конкретном, использованном различными авторами количестве параметров, сможем найти все пять точек для построения равнобочной гиперболы, и тем самым кривая зависимости точности расчётов усилий резания от количества учитываемых параметров и их сочетаний будет в достаточной степени определена.

При выборе асимптот в качестве осей координат имеем простое уравнение равнобочной гиперболы [16] в случае $x \geq 0,1$ и $y \geq 0,1$, где x – количество параметров резания и их сочетаний с учётом характеристик параметров, а y - точность определения параметров усилия резания в долях процента:

$$xy = a^2/2, \quad (1)$$

здесь a – расстояние от центра симметрии до вершины гиперболы, т.е. половина действительной оси. Ограничения величин x и y введены нами для упрощения анализа зависимости, т.к. $x = 0,1$ означает, что не считается значимым параметр, который определяется менее чем одной характеристикой из десяти имеющихся, а также не считается достижимым определение $y = 0,1\%$, т.к. само число параметров, необходимых для определения усилия резания, столь велико, что не позволяет надеяться на получение столь высокой точности расчётов.

Координаты третьей точки для построения кривой «точность расчёта усилий резания – количество учитываемых параметров процесса резания» - найдём из классического литературного источника [17]. Н.Н. Зоревым было показано, что разброс результатов расчёта усилия резания по одному из двух его оригинальных алгоритмов для сталей и чугунов (для постоянной стойкости инструмента) при сопоставлении 128 значений проекций силы резания, найденных им экспериментально, а также по разработанным номограммам, колеблется в пределах 10-15%, т.е. средняя погрешность вычислений составляет 10%, а максимальная 15% с относительной приведённой погрешностью 0,8% [17]. При этом количество сочетаний основных учитываемых параметров в более точном алгоритме оценивается числом одиннадцать (следует отметить, что точность его расчётов по усадке стружки, при использовании всего восьми параметров, несколько меньше [17]), т.е. расчётом Н.Н. Зорева при постоянной стойкости инструмента фактически может быть установлено положение третьей точки на гиперболе, которая будет определяться средней погрешностью 10% при максимальной погрешности 15% и количеством параметров – 11.

Четвёртую точку определим путём сравнения расчёта усилия резания конструкционных сталей (в нашем случае ст.10 и ст.50) по упрощённому уравнению Г.И. Грановского [3], полученного с помощью всего трёх параметров резания (коэффициента, предела прочности материала заготовки на разрыв и площади сечения среза) с экспериментальными данными Н.Н.

Зорева [17] и А.М. Розенберга [18] – см. таблицу 1. Для обработки конструкционных сталей резцами из твёрдого сплава с заданной геометрией упрощённая формула Г.И. Грановского имеет вид:

$$P = K_p \sigma_b f_n, \quad (2)$$

где $K_p \sim 2.5$ - коэффициент по Г.И. Грановскому; σ_b - предел прочности материала заготовки на разрыв; $f_n = tS$ - площадь сечения среза – см. таблицу 1.

Таблица 2

Погрешности расчёта усилия резания по упрощённому уравнению А.В. Панкина [19]

Обрабатываемый материал и его характеристики σ_b , ГПа	Режимы резания t мм / S мм/об / v м/мин	Экспериментальный коэффициент по А.В. Панкину [19] $190xk/$ передний угол резца, γ°	Усилие резания по формуле А.В. Панкина, кН	Усилие резания по эксперименту, кН (источники - см. ссылку)	Погрешность расчёта усилия резания по А.В. Панкину, %	Ссылка
Ст.У8, $\sigma_b = 0,765$ ГПа	4/0,51/84	190/10	0,468	0,43	8,84	Табл. на с.30 [17]
Ст.У8, $\sigma_b = 0,765$ ГПа	4/0,156/180	190/10	1,21	1,42	- 22,9	Табл. на с.30 [17]
Ст.У8А, $\sigma_b = 1,27$ ГПа	0,5/0,21/-	190x1,4/8	0,42	0,32	31,3	Табл.8 [4]
Ст.10, $\sigma_b = 0,907$ ГПа	0,5/0,21/-	190x1,2/0	0,36	0,236	52,5	Табл.8 [4]
Ст.10, $\sigma_b = 0,905$ ГПа	0,5/0,21/-	190x1,2/8	0,36	0,228	57,9	Табл.8 [4]
Ст.20, $\sigma_b = 0,950$ ГПа	0,5/0,21/-	190x1,2/8	0,36	0,225	60,0	Табл.8 [4]
Ст.45, $\sigma_b = 1,10$ ГПа	0,5/0,21/-	190x1,4/8	0,42	0,255	64,7	Табл.8 [4]

В результате обработки данных получим среднюю и максимальную погрешности расчёта усилия резания по трём параметрам - $\delta_{cp} = 23,2\%$, $\delta_{max} = 52,0\%$ с относительной приведённой погрешностью 8%, см. таблицу 1.

Пятая точка может быть определена из сравнения результатов расчёта по справочным формулам режимов резания, например, по формуле А.В. Панкина [19], с экспериментальными данными Н.Н. Зорева [17] и А.М. Розенберга [18] – см. таблицу 2.

Формула А.В. Панкина

$$P_z = C t S^{0,75} \quad (3)$$

дана для обработки резцами из твёрдого сплава Т15К6 сталей с различным пределом прочности [пример А.В. Панкина дан для $\sigma_b = 0,765$ ГПа, т.е. стали У8 твёрдостью НВ215 при экспериментальном коэффициенте $C = 190 k$ ($k = 1$)], что позволяет нам использовать для определения составляющей усилия резания P_z всего два параметра: данный экспериментальный коэффициент и площадь сечения среза. Для увеличения количества данных по формуле (3) нами рассчитаны также усилия резания для сталей ст.10, ст.20, ст.45, У8А в сравнении с экспериментальными данными Н.Н. Зорева [17] и А.Л. Воронцова [4] – см. таблицу 2.

Таким образом, получены средняя и максимальная погрешности расчёта усилия резания по двум параметрам в формуле А.В. Панкина - $\delta_{cp} = 42,6\%$, $\delta_{max} = 64,7\%$ с относительной приведённой погрешностью 8% – таблица 2.

Теперь мы полностью определили кривую «точность расчётов усилий резания – количество учитываемых параметров процесса резания» в виде равнобочной гиперболы. Полу-

ченные результаты перенесены на график – см. рисунок 1.

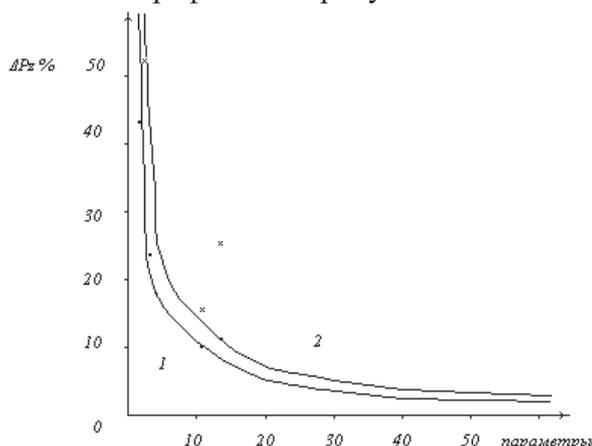


Рисунок 1. Часть гиперболических зависимостей $xу = a^2/2$ средней – 1 и максимальной – 2 погрешностей усилия резания ΔP_z от количества параметров (сочетаний параметров) процесса резания в зоне фокуса кривых. Точки вокруг кривой 1 и кресты вокруг кривой 2 – результаты расчётов по данным [3,7,17,19]

Анализ зависимости 1 на рисунке 1 показывает, что половина действительной оси $a = \text{const}$ в данной зависимости равняется 13,228 и, таким образом, мы получили простое уравнение равнобочной гиперболы [16], при $x \geq 0,1$ и $y \geq 0,1$, где x – количество параметров и сочетаний параметров резания, а y – точность определения усилия резания в долях процента:

$$xy \sim 87,49. \tag{4}$$

По Г. Корну и Т. Корну [20], полученное уравнение - кривая второго порядка и вполне определяется пятью своими точками, если никакие четыре не лежат на одной прямой. Решение уравнения кривой второго порядка, проходящей через пять точек $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4), (x_5, y_5)$:

$$\begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 y_3 & y_3^2 & x_3 & y_3 & 1 \\ x_4^2 & x_4 y_4 & y_4^2 & x_4 & y_4 & 1 \\ x_5^2 & x_5 y_5 & y_5^2 & x_5 & y_5 & 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0.01 & 3.8 \times 10^{30} & 1.444 \times 10^{63} & 0.1 & 3.8 \times 10^{31} & 1 \\ 4 & 85.2 & 1.815 \times 10^3 & 2 & 42.6 & 1 \\ 9 & 69.6 & 538.24 & 3 & 23.2 & 1 \\ 121 & 110 & 100 & 11 & 10 & 1 \\ 1.444 \times 10^{63} & 3.8 \times 10^{30} & 0.01 & 3.8 \times 10^{31} & 0.1 & 1 \end{pmatrix}$$

и точный график полной зависимости практически сливается с осями координат (рисунок 2).

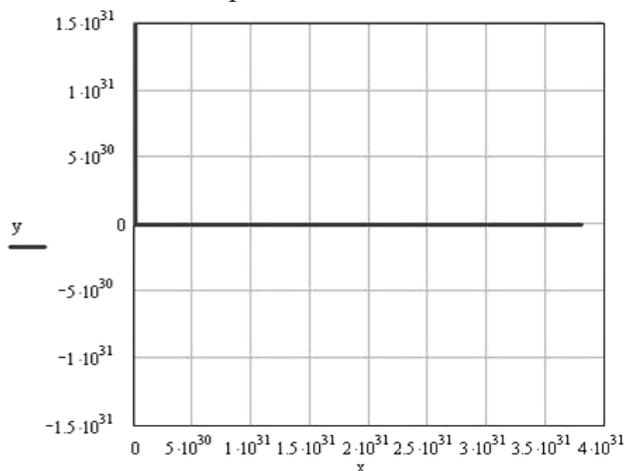


Рисунок 2. Полный график равнобочной гиперболы с уравнением $xу = a^2/2 = 87,49$ (x – количество параметров и сочетаний параметров усилия резания, y – средняя погрешность определения усилия резания ΔP_z)

Следует отметить, что полученная зависимость для средней погрешности усилия резания действительна только в случае резания конструкционных сталей твердосплавными резцами, т.к. именно эти данные использованы для определения двух из пяти точек гиперболы – см. таблицу 1 и 2. Оценка точности зависимости по отклонению действительной полуоси гиперболы a от её среднего значения $a_{cp} = 13,228$ в области $x = 2 - 11$, $y = 10 - 42,6$ даёт погрешность $\pm 12\%$. У данной версии модели имеется существенная особенность: в силу различного веса параметров шкала по оси x не должна быть равномерной. Тем более что по этой оси отложены не только основные входные и выходные параметры, дополнительные параметры с их характеристиками, но и результаты взаимодействия и взаимовлияния параметров и их характеристик первого, второго и т.д. порядков. Такого вида особенность при небольшом количестве градаций преодолима путём структуризации и нормирования, но для числа сочетаний $3,8 \cdot 10^{31}$ не может являться принципиальным ограничением, так как число градаций столь велико, что в пределе равномерность шкалы не имеет существенного значения.

Можно определить положение и шестой (дополнительной точки), например, воспользовавшись данными Ю.Н. Внукова [7], разработавшего несколько иную модель процесса резания на основе уточнённого алгоритма А.М. Розенберга. Результаты его расчетов усилий резания для ст.10, ст.30, ст.40, ст.50 показывают, что средняя погрешность не превысила 11%, а максимальная - 25% [7] при 14 задействованных параметрах процесса резания – см. рисунок 1.

Данные сведения избыточны для определения положения рассматриваемых зависимостей, менее представительны относительно результатов Н.Н. Зорева, но при необходимости могут служить для дополнительного уточнения погрешностей положения полученных гипербол. Следует заметить, что несколько более высокая погрешность модели Ю.Н. Внукова [7] и некоторое отклонение соответствующей ей точки на графике (см. рисунок 1) может быть связано с тем, что исходные положения и допущения моделей процесса резания по алгоритмам А.М. Розенберга (исходного для модели Ю.Н. Внукова) и Н.Н. Зорева существенно различаются (А.М. Розенберг использовал уравнение для тангенциальной силы резания на основе оригинальной гипотезы о равенстве удельных работ пластической деформации при резании и сжатии в условиях равных пластических деформаций) [15].

На рисунке 1 также показана гиперболическая зависимость 2, построенная по максимальным погрешностям расчёта усилий резания, но с допущением, что $x \geq 1$ и $y \geq 1$, где x – количество параметров резания, начиная с одного, а y – максимальная погрешность определения параметра усилия резания, начиная с одного процента, что не противоречит исходным положениям. Решение уравнения данной кривой второго порядка, проходящей через пять точек с максимальными погрешностями расчётов (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , (x_4, y_4) , (x_5, y_5) :

$$\begin{bmatrix} (x_1)^2 & x_1 y_1 & (y_1)^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ (x_2)^2 & x_2 y_2 & (y_2)^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ (x_3)^2 & x_3 y_3 & (y_3)^2 & x_3 & y_3 & 1 \\ (x_4)^2 & x_4 y_4 & (y_4)^2 & x_4 & y_4 & 1 \\ (x_5)^2 & x_5 y_5 & (y_5)^2 & x_5 & y_5 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 3,8 \times 10^{31} & 1,444 \times 10^{63} & 1 & 3,8 \times 10^{31} & 1 \\ 4 & 129,4 & 4,186 \times 10^3 & 2 & 64,7 & 1 \\ 9 & 156 & 2,704 \times 10^3 & 3 & 52 & 1 \\ 121 & 165 & 225 & 11 & 15 & 1 \\ 1,444 \times 10^{63} & 3,8 \times 10^{31} & 1 & 3,8 \times 10^{31} & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Данная работа показывает, что путём частичного использования гипотетических сведений и фактического экстраполирования зависимости погрешностей расчётов усилий резания ΔP_z от количества параметров и их сочетаний вплоть до $x = 3,8 \cdot 10^{31}$ [6], с использованием известных результатов классических работ по теории резания [3,4,17,18], возможна разработка модели подпараметра процесса резания, и с её помощью - проведение априорной оценки погрешностей составляющих расчётных модулей CAD/CAM/CAE/PDM – систем.

Из анализа полученных предварительных результатов для токарной обработки кон-

струкционных сталей твердосплавными резами, например, следует, что при использовании 20 параметров резания имеется возможность достижения средней погрешности расчёта усилия резания около 4%, при 50 – около 2%, при 100 – около 1% и т.д. Потому на основе данной работы возможно выработать рекомендации по обеспечению библиотеки модуля расчёта режимов резания CAD/CAM/CAE/PDM – систем в части подмодуля расчётов усилий резания, моделью априорной оценки точности применяемых и новых расчётных алгоритмов в зависимости от заданного количества сочетаний параметров процесса резания.

Таким образом, на основе концепции Ю.М. Ермакова [6] разработана гипотетическая математическая модель предварительной оценки зависимости средней, максимальной погрешностей расчётов усилия резания ΔP_z от количества параметров, сочетаний параметров (характеристик), определяющих процесс резания. Показаны возможности предварительной оценки точности новых алгоритмов расчётов усилий резания - одного из важнейших параметров процесса, т.е. усилия резания P_z , на основе заданных погрешностей и количества задействованных параметров процесса резания. В качестве гипотетической модели оценки предложена действительная часть (расположенная в первом квадранте) гиперболической зависимости вида $xy = a^2/2$ средней и максимальной погрешностей усилия резания ΔP_z от количества параметров, сочетаний параметров (характеристик), определяющих процесс резания. Даны рекомендации по оценке точности определения усилия резания в зависимости от количества учитываемых факторов процесса резания.

Предложенная гипотетическая зависимость является прямым теоретическим следствием концепции Ю.М. Ермакова [6], построена на основе уравнений механики резания, экспериментально подтверждённых авторами классических работ по теории резания [3,4,17,18]. Интерполяционные возможности модели реализованы с погрешностью в пределах $\pm 12\%$ (в диапазоне 2-11 параметров), а её фактически экстраполированная часть может быть пригодна для предварительной оценки погрешностей расчётов усилий резания во всём достижимом диапазоне параметров резания. Модель удобна для анализа, включает наилучшие, достигнутые к настоящему времени результаты расчётов точности усилий резания и, возможно, применима как для конструкционных сталей при обработке резанием резами из твёрдых сплавов, так, и с некоторыми ограничениями, для оценки погрешности расчёта усилий резания практически любых материалов.

Следует отметить ограничения в применении гипотетической модели. Полученная зависимость отражает лишь теоретическую тенденцию снижения погрешности расчётов усилия резания при увеличении количества учитываемых параметров процесса резания, т.е. она может выполняться только при адекватном совершенствовании теоретических положений, лежащих в основе алгоритмов расчётов усилий резания. Несомненно, ошибки от внесения исследователями дополнительных погрешностей при неоправданном усложнении схемы резания (например, от допущений на основе недостаточно обоснованных теоретических положений; от внесения дополнительных погрешностей путём принятия допущений, имеющих значительные ограничения по точности), а также фактическая неравномерность функциональной шкалы, заложенная в самой модели, могут несколько нарушать плавный ход полученной теоретической зависимости. При этом общая тенденция, установленная гипотетической моделью, должна сохраниться и проявиться непосредственно после устранения дополнительных погрешностей, уточнения используемых в основе расчётов теоретических положений или при значительном росте количества учитываемых факторов.

В общем, результаты работы показывают, что исходя из требуемых погрешностей расчётов параметров резания, используя простейший математический аппарат можно производить априорную оценку погрешностей составляющих расчётных модулей CAD/CAM/CAE/PDM – систем в обеспечении нормирования их точности и указания погрешности расчётов непосредственно в теле модулей систем, без ссылок на справочники, практически не содержащие оценок точности. Кроме того, результаты данной работы позволяют оценить возможности анализа перспектив повышения точности разрабатываемых алгоритмов, наметить пути повышения экономической эффективности новых моделей того или

иного параметра процесса резания и, в частности - разработки более точных аналитических моделей расчёта усилий резания.

Выводы

1. На основе представлений современных исследователей о структурной схеме процесса резания и количестве вариантов взаимодействия параметров резания разработана гипотетическая математическая модель оценки зависимости средней (максимальной) погрешностей расчётов усилия резания ΔP_z от количества параметров (характеристик и вариантов их взаимодействия), определяющих процесс резания.

11. В качестве гипотетической модели оценки предложена действительная часть гиперболы зависимости вида $xy = a^2/2$ средней и максимальной погрешностей усилия резания ΔP_z от количества параметров (характеристик и их сочетания), определяющих процесс резания.

12. Предложенная гипотетическая модель является прямым теоретическим следствием концепции Ю.М. Ермакова, построена на основе классических уравнений механики резания, удобна для анализа, базируется на данных, полученных в процессе обработки резанием конструкционных сталей резцами из твёрдых сплавов, экспериментально подтверждённых авторами классических работ по теории резания.

13. Данная модель позволяет на основе заданных погрешностей и количества задействованных параметров процесса резания производить предварительную оценку точности как старых, так и новых алгоритмов расчёта усилий резания.

14. При анализе полученных результатов для случая токарной обработки конструкционных сталей твердосплавными резцами показано, например, что при использовании 20 основных (наиболее важных) параметров резания имеется гипотетическая возможность достижения средней погрешности расчёта усилия резания около 4%, при 50 – около 2%, при 100 – около 1% и т.д.

15. На основе разработанной гипотетической модели могут быть выработаны рекомендации по оценке точности определения усилия резания в зависимости от количества учитываемых параметров процесса, а также по проведению априорных оценок погрешностей расчёта усилия резания в подмодулях САПР.

Литература

1. Ящерицын П.И. Теория резания: учеб. / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич.— 2-е изд., испр. и доп. — Мн.: Новое знание, 2006. — 512 с. : ил. — (Техническое образование).
2. Пестрецов С.И. Компьютерное моделирование и оптимизация процессов резания : учеб. пособие /С.И. Пестрецов. - Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009 - 104 с.
3. Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов.— М.: Высш. шк., 1985.— 304 с.
4. Серия статей "Проблемы теории и практики резания материалов" Вестник машиностроения 2008. № 1-12. А.Л. Воронцов, Н.М. Султан-Заде, А.Ю. Албагачиев (МГУПИ).
5. Ермаков Ю.М. Комплексные способы эффективной обработки резанием: Библиотека технолога. - М: Машиностроение, 2005. - 272 с: ил.
6. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. М.: Машиностроение, 2009. 640 с.
7. Внуков Ю.Н., Саржинская А.Г. Методика теоретического определения составляющих силы резания при токарной обработке// Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение.- К.: НТУУ «КПИ».- 2007.-№ 52.- С.377- 384.
8. Верещака А.С. Резание материалов: Учебник/А.С Верещака, В.С. Кушнер. — М: Высш. шк., 2009. — 535 с.
9. Петрушин С. И. Введение в теорию несвободного резания материалов. Учебное пособие. - Томск: Изд. ТПУ, 1999. - 97 с.
10. Рыжкин А.А. Обработка материалов резанием: учебное пособие /А.А. Рыжкин, К.Г. Шу-

чев, М.М. Климов. Ростов н/Д : Феникс, 2008. 411 с.

11. Грубый С.В. Расчетные параметры процесса резания и стружкообразования при точении конструкционных сталей и сплавов. Вестник машиностроения. 2006. № 1. с. 63-72.

12. Сопоставительный анализ методов расчета процесса резания (к разработке аналитической методики расчета процессов резания). Максимов Ю.В., Оленин Л.Д., Шапаровская М.А. Известия МГТУ «МАМИ» № 1(11), 2011, С. 159-169.

13. E.M. Trent, P.K. Wright, Metal Cutting. Forth Edition, Butterworth, Boston USA 2000, 446.

14. Справочник по обработке резанием. Garant. Cutting Pilot Hoffmann Group. ФРГ. 2009. р. 842. www.garant-tools.com, www.iwu.fraunhofer.de.

15. Развитие науки о резании металлов. Коллектив авторов, /Под ред. д-ра техн. наук проф. Н.Н. Зорева. М., Машиностроение, 1967. с. 416.

16. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – 13-е изд., - М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.

17. Зорев Н. Н. «Расчёт проекций силы резания». Машгиз, Москва 1958, 56 с.

18. Розенберг А. М., Ерёмин А. Н., Элементы теории процесса резания металлов, Машгиз, Москва, 1956, Свердловск. – 320 с.

19. Панкин А. В., Обработка металлов резанием. М., Машгиз, 1961, 520 с.

20. Г. Корн, Т. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Изд. 4-е. /Под ред. И.Г. Арамановича, Наука, М.:1978. 832 с.

О коэффициенте резания при точении

к.т.н. доц. Волков А.В., Матвеев С.В.

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
8906508837, 89206113144

Аннотация. Приведён обзор формул для упрощённого определения усилий резания при точении. Даны рекомендации по их применению, а также - по оценке точности определения усилий резания, в том числе для разработки подмодулей расчёта режимов резания CAD/CAM/CAE/PDM – систем.

Ключевые слова: точение, коэффициент резания, усилие резания, примерный расчёт, предел прочности на разрыв, твёрдость.

При решении некоторых задач в производственных условиях специалистам может потребоваться, не прибегая к непосредственным экспериментам, оценить уровень сил при обработке резанием по простой аналитической зависимости [1]. Знания о возможности предварительного определения сил резания могут быть полезны также разработчикам расчётных модулей CAD/CAM/CAE/PDM - систем и студентам технических вузов – будущим инженерам-эксплуатационникам технологий, инструмента и оборудования при механической обработке материалов.

Считается, что к настоящему времени проблема теоретического расчёта величины и направления системы сил, действующих при точении, в основном, решена, и сила резания может быть рассчитана на основе теорий пластичности, упругости и др. [2]. Однако аналитический подход может быть использован только в случаях, когда известны значения основных параметров процесса, что бывает далеко не всегда [3]. Кроме того, для проектирования технологических процессов металлообработки необходимы не только сведения о величине сил резания, требующиеся при проектировании станков, режущего инструмента, приспособлений, выборе оптимальных режимов резания, но и данные о точности их определения, в справочной литературе по режимам резания практически отсутствующие [1,18].

В литературе по резанию металлов под усилием резания обычно понимают вертикальную составляющую и обозначают ее буквой P без указания индекса. Лишь в тех случаях, когда имеются в виду определенные технологические составляющие, употребляют обозначения P_z , P_y и P_x [1]. При этом значение равнодействующей силы резания P_p оценивается как P_p